

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Aplicação de gesso de dessulfuração de gases de combustão na
melhoria de atributos químicos de solos impactados pela mineração de
carvão e efeitos sobre atributos de plantas**

Júlia Lima Reginato

Pelotas, 2020

Júlia Lima Reginato

**Aplicação de gesso de dessulfuração de gases de combustão na
melhoria de atributos químicos de solos impactados pela mineração de
carvão e efeitos sobre atributos de plantas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientador: Professor Dr. Filipe Selau Carlos
Coorientador: Professor Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R335a Reginato, Júlia Lima

Aplicação de gesso de dessulfuração de gases de combustão na melhoria de atributos químicos de solos impactados pela mineração de carvão e efeitos sobre atributos de plantas / Júlia Lima Reginato ; Filipe Selau Carlos, orientador ; Luiz Fernando Spinelli Pinto, coorientador. — Pelotas, 2020.

128 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Fertilidade do solo. 2. Áreas degradadas. 3. Solo agrícola. I. Carlos, Filipe Selau, orient. II. Pinto, Luiz Fernando Spinelli, coorient. III. Título.

CDD : 631.4

Banca examinadora:

Prof. Dr. Filipe Selau Carlos (Orientador)
Universidade Federal de Pelotas/RS

Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto
Universidade Federal de Pelotas/RS

Prof^a. Dr^a. Lizete Stumpf
Universidade Federal de Pelotas/RS

Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa
Universidade Federal de Pelotas/RS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e por acompanhar-me durante esta jornada, onde por vezes ajudou-me a levantar, a ter força para enfrentar os obstáculos diários e as provações, e por meio da fé me deu coragem para seguir em frente.

Aos meus pais, João e Cláudia, não existem palavras suficientes para agradecer, pelo apoio, pelo amor incondicional, pela força, pelo suporte e amparo de todos os dias. Sem vocês eu nada seria.

A minha irmã, Mariáh, que segurou a barra comigo, dividiu os piores e melhores momentos, me abraçou e me apoiou. Tua presença constante me fez mais forte e permitiu que, ao chegar em casa, a leveza da vida permanecesse.

A todos os meus familiares e amigos, pelo incentivo, pelas palavras de conforto, mesmo distantes fisicamente.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, pela oportunidade.

Aos professores, colegas e amigos, pelo companheirismo e aprendizado constante.

Ao orientador Prof. Dr. Filipe Selau Carlos, pelo incentivo, apoio e conhecimento compartilhado.

Ao coorientador Prof. Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto, pelos ensinamentos.

A todos que fizeram parte desta caminhada e me fizeram mais forte na busca deste objetivo, meu muito obrigada.

RESUMO

Reginato, Júlia Lima. **Aplicação de gesso de dessulfuração de gases de combustão na melhoria de atributos químicos de solos impactados pela mineração de carvão e efeitos sobre atributos de plantas.** 2020. 128f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

O FGD-gesso é um resíduo sólido proveniente da retirada do enxofre dos gases exaustos nas centrais de queima de carvão mineral. Este resíduo é rico em CaSO_4 e assemelha-se muito ao gesso agrícola, devido a capacidade de aportar Ca e S ao solo, além de apresentar potencial para alterar o pH do solo devido aos agentes alcalinizantes utilizados durante o processo de retirada do enxofre da corrente gasosa. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do FGD-gesso como corretivo de acidez em solos impactados pela mineração de carvão e em solos de utilização agrícola, bem como seu efeito nos atributos químicos do solo, na composição química e nos atributos de desenvolvimento de plantas. Foram realizados dois estudos, o primeiro estudo foi conduzido em casa de vegetação utilizando dois solos impactados pela mineração de carvão, onde foram cultivadas aveia e azevém. O segundo estudo foi realizado a campo em Planossolo agrícola sob cultivo de soja, associando a aplicação de calcário e gesso agrícola ao FGD-gesso. No estudo 1, o FGD-gesso reduziu a acidez ativa e potencial de ambos os solos estudados, bem como o teor de Al trocável e proporcionou aumento nos teores de Ca, Mg, Zn e Cu, sem que houvesse aumento na concentração de elementos traço. No estudo 2, houve sinergia entre a aplicação conjunta de calcário e gesso agrícola sobre as variáveis pH SMP, K, S, Ca, C.E. e V% do solo; o FGD-gesso aumentou a disponibilidade de P, diminuiu o Al tóxico, incrementou Ca e S no perfil, e aumentou os teores de Mg em profundidade. Deste modo, a aplicação de FGD-gesso constitui alternativa relevante para a melhoria de atributos químicos de solos impactados pela mineração de carvão, bem como para solos agrícolas de terras baixas do sul do Brasil.

Palavras-chave: fertilidade do solo; áreas degradadas; solo agrícola.

ABSTRACT

Reginato, Júlia Lima. **Application of flue gas desulfurization gypsum to improve chemical attributes of soils impacted by coal mining and effects on plant attributes.** 2020. 128f. Dissertation (Master degree) - Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

FGD-gypsum is a solid residue from the removal of sulfur from exhaust gases in coal-fired plants. This residue is rich in CaSO_4 and is very similar to agricultural gypsum, due to the ability to bring Ca and S to the soil, in addition to having the potential to change the pH of the soil due to the alkalizing agents used during the process of removing sulfur from the current gaseous. Thus, the objective of this work was to evaluate the use of FGD-gypsum as an acidity corrective in soils impacted by coal mining and in soils for agricultural use, as well as its effect on the chemical attributes of the soil, the chemical composition and the attributes of plant development. Two studies were carried out, the first study was conducted in a greenhouse using two soils impacted by coal mining, where oats and ryegrass were grown. The second study was carried out in the field in agricultural Ultisol under soybean cultivation, associating the application of lime and agricultural gypsum to FGD-gypsum. In study 1, FGD-gypsum reduced the active and potential acidity of both studied soils, as well as the exchangeable Al content and provided an increase in the levels of Ca, Mg, Zn and Cu, without an increase in the concentration of trace. In study 2, there was a synergy between the joint application of lime and agricultural gypsum in the variables pH SMP, K, S, Ca, C.E. and V% of the soil; FGD-gypsum increased the availability of P, decreased toxic Al, increased Ca and S in the profile, and increased the levels of Mg in depth. In this way, the application of FGD-gypsum is a relevant alternative for improving the chemical attributes of soils impacted by coal mining, as well as for agricultural soils in the lowlands of southern Brazil.

Keywords: soil fertility; degraded areas; agricultural soil.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Produtividade aveia – Topsoil (A); produtividade aveia - Estéril (B); produtividade média da aveia em ambos os solos (C). ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Tratamentos: T1 – 0 SMP (Testemunha); T2 – 2 SMP FGD-gesso.....74
- Figura 2. Produtividade azevém – Topsoil (A); produtividade azevém - Estéril (B); produtividade média do azevém em ambos os solos (C). ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Tratamentos: T1 – 0 SMP (Testemunha); T2 – 2 SMP FGD-gesso.....76
- Figura 3. Croqui dos experimentos conforme doses de calcário, gesso agrícola e FGD-gesso em Planossolo sob cultivo de soja em Arroio Grande e Rio Grande - RS.....85
- Figura 4. Estatura (A); número de vagens por planta (B) e número de grãos por vagem (C) em soja cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Arroio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: semcalcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 100
- Figura 5. Figura 5. Peso de 1000 grãos (A) e produtividade de soja (B) cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Arroio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: semcalcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 101

Figura 6. Estatura (A); número de vagens por planta (B) e número de grãos por vagem (C) cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Rio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: sem calcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 103

Figura 7. Peso de 1000 grãos (A) e produtividade a soja (B) cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Rio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: sem calcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores orientadores de elementos-traço para solos brasileiros.	31
Tabela 2. Disponibilidade de metais em diferentes condições de solo.....	31
Tabela 3. Caracterização química do “topsoil” e do Estéril e a interpretação da disponibilidade de nutrientes e da acidez para culturas exigentes conforme recomendação do Sul do Brasil.....	42
Tabela 4. Caracterização química básica do FGD-gesso.	43
Tabela 5. Tratamentos utilizados no experimento de casa de vegetação.	44
Tabela 6. Valores de pH em água e pH SMP para o “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.....	46
Tabela 7. Valores de pH em água e pH SMP para o “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.....	47
Tabela 8. Teores de P, K, Ca e Mg no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.	49
Tabela 9. Teores de P, K, Ca e Mg no “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.	50
Tabela 10. Teores de Na, Fe, Zn, Si, Al e Mn no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.....	51
Tabela 11. Teores de Na, Fe, Zn, Si, Al e Mn no “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.....	53
Tabela 12. Teores Cu, Pb, Cr, Se e Ba no “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.....	56
Tabela 13. Teores Cu, Pb, Cr, Se e Ba no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.	57
Tabela 14. Condutividade elétrica no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia e azevém, sob aplicação de FGD-gesso.....	59

Tabela 15. Teores de K, Ca, Mg na parte aérea de plantas de aveia e azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão sob aplicação de FGD-gesso.....	60
Tabela 16. Teores de Na, Fe, Si, Mn, Al e Zn na parte aérea de plantas de aveia cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	63
Tabela 17. Teores de Na, Fe, Si, Mn, Al e Zn na parte aérea de plantas de azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão	65
Tabela 18. Teores de Ba, Pb, Cu, Cr e Se na parte aérea de plantas de aveia cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	67
Tabela 19. Teores de Ba, Pb, Cu, Cr e Se na parte aérea de plantas de azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	68
Tabela 20. Teores de Ca, Mg e K nas raízes de plantas de aveia e azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	69
Tabela 21. Teores de Na, Mn, Cu, Zn e Fe nas raízes de plantas de aveia cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	70
Tabela 22. Teores de Na, Mn, Cu, Zn e Fe nas raízes de plantas de azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	71
Tabela 23. Parâmetros químicos do solo previamente ao estabelecimento do experimento em Arroio Grande - RS e Rio Grande - RS.....	82
Tabela 24. Caracterização química básica do FGD-gesso.	83
Tabela 25. Tratamentos conforme doses de calcário gesso e FGD-gesso em Planossolo sob cultivo de soja em Arroio Grande e Rio Grande.....	83
Tabela 26. Valores de pH e teores de P em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.....	88
Tabela 27. Valor de pH SMP em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.	88
Tabela 28. Teores de Mn em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.	89

Tabela 29. Teores de Al em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.....	90
Tabela 30. Teores de K em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.....	92
Tabela 31. Teores de Na em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande – RS.	92
Tabela 32. Teores de Mg em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande – RS.	93
Tabela 33. Teores de S e Ca em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.	95
Tabela 34. Condutividade elétrica em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.	97
Tabela 35. Saturação de bases em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande-RS relacionadas a camada amostral, dose de calcário, doses de gesso agrícola e FGD-gesso adicionados ao solo.....	98
Tabela 36. Matriz de correlação linear entre os atributos químicos do solo e a produtividade de soja em Planossolo após a aplicação de calcário, gesso agrícola e FGD-gesso, em Rio Grande – RS.	107

SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
2. Hipóteses.....	17
3. Objetivos.....	17
3.1 Geral	17
3.2 Específicos.....	17
4. Revisão Bibliográfica	18
4.1 Carvão mineral e características da jazida de Candiota – RS	18
4.2 Solos degradados pela mineração de carvão.....	19
4.3 Geração de resíduos associados a produção de energia em termelétricas	22
4.4 Potencial da utilização de resíduos da dessulfurização (FGD-gesso) na recuperação de solos degradados	25
4.5 Potencial agrônômico da utilização de resíduos da dessulfurização (FGD-gesso) na agricultura	26
4.6 Metais pesados presentes no resíduo da dessulfurização (FGD-gesso) e seus potenciais impactos no solo e desenvolvimento de plantas.....	29
4.7 Atributos químicos de solo limitantes ao desenvolvimento de soja no Rio Grande do Sul.....	33
4.8 Soja em terras baixas.....	34
4.9 Utilização de gesso agrícola no solo	35
5. Capítulo 1 – Influência da aplicação de FGD-gesso sobre atributos químicos de solo e plantas de Aveia e Azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.....	38
5.1 Introdução	38
5.2 Material e Métodos.....	40
5.2.1 Local.....	40
5.2.2 Solos	40
5.2.3 Delineamento experimental e tratamentos.....	43
5.2.4 Determinações	44
5.2.4.1 Produtividade das culturas	44

5.2.4.2 Análises químicas.....	45
5.2.4.2.1 Análises químicas de planta	45
5.2.4.2.2 Análises químicas dos solos.....	45
5.2.5 Análise estatística de dados	46
5.3 Resultados e discussão.....	46
5.3.1 Atributos químicos de solo.....	46
5.3.2 Teores de elementos de parte aérea e raízes de plantas	59
5.3.3 Produtividades.....	73
5.4 Conclusões.....	77
6. Capítulo 2 – Atributos químicos de Planossolo e componentes de rendimento de plantas soja sob aplicação de calcário, gesso agrícola e FGD-gesso.....	79
6.1 Introdução	79
6.2 Material e Métodos	80
6.2.1 Locais.....	80
6.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	83
6.2.3 Determinações	85
6.2.3.1 Componentes de rendimento da cultura da soja.....	85
6.2.3.2 Atributos de químicos de solo.....	86
6.2.3.3 Análise estatística de dados	86
6.3 Resultados e Discussão	87
6.3.1 Atributos químicos e teores de nutrientes disponíveis após o cultivo da soja	87
6.3.2 Produtividade da soja e componentes de rendimento	99
6.4 Conclusões.....	108
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1. Introdução

O carvão mineral é uma mistura de componentes orgânicos e inorgânicos fossilizados a milhões de anos. São encontradas reservas de carvão em praticamente todo o mundo, porém, as maiores situam-se na América do Norte, Rússia, Europa, China e Austrália, somando cerca de 80% dos estoques mundiais. No Brasil, as jazidas de maior importância econômica estão situadas nos estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul; a maior jazida de carvão mineral do país encontra-se no município de Candiota, no Rio Grande do Sul (ANEEL, 2008).

A Mina de Candiota é propriedade da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), e o carvão por ser extraído a céu aberto caracteriza uma fonte altamente poluidora, capaz de causar grandes impactos ao meio ambiente, principalmente devido à remoção de grandes volumes, tanto de solo quanto de rocha, resultando em alterações físicas, químicas e biológicas desses perfis (FISCHER; FISCHER, 2006). Após o término da extração do carvão a topografia do local é recomposta e os horizontes anteriormente retirados são realocados, formando um solo construído que, devido às degradações sofridas, torna difícil a recuperação da qualidade destes solos, e conseqüentemente o reestabelecimento de vegetação nestas áreas (SCHAFER, 1980; NUNES, 2002).

Em áreas com presença do mineral pirita (FeS_2), como é o caso das áreas onde há presença de carvão mineral, ocorre o processo conhecido como drenagem ácida da mina (DAM). Esse processo origina-se da exposição destes sulfetos ao O_2 atmosférico fazendo com que, através da oxidação destes minerais, haja a formação de ácido sulfúrico gerando condições de extrema acidez (PINTO; KAMPF, 2002). Segundo Tiwary et al. (1997) o baixo pH e a alta concentração de sulfatos, que podem ocasionar a precipitação de sais e de metais, principalmente Fe, Al e Mn, são características comuns da DAM.

Por apresentar baixo poder calorífico e alto teor de impurezas, o carvão retirado da mina tem sua utilização limitada quase que exclusivamente a geração de energia elétrica, sendo então utilizado como matéria-prima na Usina Termelétrica Presidente Médici (UTPM), também situada no município de Candiota (CRM, 2018).

A queima do carvão nas usinas gera resíduos inorgânicos que são conhecidos como produtos da combustão do carvão. Os produtos originados são compostos pelas cinzas leves, cinzas de fundo, escórias e também pelo sólido oriundo do processo de dessulfuração dos gases exaustos (FGD-gesso) (KALYONCU; OLSON, 2001). A intensificação do uso de carvão para produção de energia elétrica traz consigo a tendência de aumentar o problema de gestão destes resíduos não só no Brasil, mas no mundo, constituindo o agravamento de problemas ambientais.

A emissão de enxofre originada pela combustão de carvão mineral implica diretamente na qualidade do ar. Elevadas emissões de S podem constituir reações químicas do tipo $\text{SO}_3(\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$, formando a chuva ácida, sendo esta extremamente danosa aos ecossistemas que se encontram principalmente no entorno das usinas termelétricas (CASTRO, 2016). Para redução da emissão, são utilizados compostos como óxido de cálcio, carbonato de cálcio e amônia que reagem com formas gasosas de enxofre e atenuam a emissão desse elemento (CGTEE, 2012). Por outro lado, a adição desses reagentes gera grandes quantidades de resíduos sólidos. Contudo, esse material apresenta características importantes, entre elas a capacidade de atuar como fonte de enxofre e cálcio para as plantas, corretivo da acidez do solo, por possuir compostos químicos com potencial de neutralização da acidez pela liberação de íons OH^- e pelo fato de possuir CaSO_4 na sua composição, pode ainda atuar como um condicionador do solo. Devido aos produtos da sua dissociação apresentarem alta mobilidade, pode aumentar a concentração de cátions básicos como Ca, Mg e K em profundidade e reduzir a atividade iônica do Al^{3+} também em profundidade, criando assim melhores condições para o desenvolvimento do sistema radicular de plantas (CAIRES et al., 2011; RHOTON; MCCHESENEY, 2011; DESUTTER et al., 2014; ENDALE et al., 2014).

Kalyoncu e Olson (2001) apontam que as propriedades físicas e químicas variam de acordo com o produto originado pela combustão, o que torna cada um destes adequado para diferentes aplicações. Sabedot (2011) ressalta que a discussão em torno dos potenciais benefícios e restrições ao uso dos resíduos da queima do carvão mineral tem despertado o interesse de pesquisadores a traçarem condições favoráveis ao uso e ainda contribuir

com informações que diminuam as dúvidas quanto às restrições, criando uma abordagem que utilize os resíduos desta indústria como matéria-prima para outras indústrias.

2. Hipóteses

O estudo apresenta como hipóteses que a utilização do FGD-gesso pode:

- I- Corrigir a acidez de solos construídos após a mineração de carvão, gerada pela oxidação da pirita (FeS_2), que confere alto grau de acidez ao solo e gera restrição ao desenvolvimento de plantas, além de aportar Ca e S, nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas;
- II- Possibilitar a redução da acidez ativa e potencial em solos agrícolas devido as características de potencial corretivo de acidez que o FGD-gesso possui.
- III- Propiciar melhores condições de disponibilidade de nutrientes similar ao uso combinado do gesso e calcário e promover um adequado desenvolvimento de plantas de soja.

3. Objetivos

3.1 Geral

Avaliar o uso do FGD-gesso como corretivo da acidez em solos impactados pela mineração de carvão e em solos de utilização agrícola, bem como seu efeito nos atributos químicos do solo, na composição química e nos atributos de desenvolvimento de plantas.

3.2 Específicos

- a) Avaliar a mudança na acidez ativa e potencial de solos impactados pela mineração de carvão sob a aplicação de FGD-gesso;
- b) Avaliar a disponibilidade de elementos-traço em solos impactados pela mineração de carvão sob a aplicação de FGD-gesso;
- c) Avaliar a composição química do tecido vegetal de plantas de aveia e azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão sob a aplicação de FGD-gesso;

d) Avaliar as mudanças na acidez ativa e potencial do solo sob aplicação do FGD-gesso em comparação ao uso combinado de gesso e calcário em Planossolo sob cultivo de soja;

e) Avaliar a disponibilidade de nutrientes em Planossolo cultivado com soja sob a aplicação de FGD-gesso em comparação a aplicação combinada de gesso e calcário;

f) Avaliar os componentes de desenvolvimento de plantas de soja cultivadas em Planossolo após aplicação de FGD-gesso, calcário e gesso agrícola.

4. Revisão Bibliográfica

4.1 Carvão mineral e características da jazida de Candiota – RS

O carvão mineral é um combustível fóssil originado a partir da deposição da matéria orgânica em bacias sedimentares, posteriormente soterradas por camadas de água, argila e areia (BORBA, 2001). O aumento da temperatura e pressão, ao longo de milhares de anos e falta de contato do material orgânico com o ar fizeram com que os restos vegetais se solidificassem, perdendo oxigênio e hidrogênio e aumentando o teor de carbono, em um processo denominado carbonificação (BORBA, 2001). Devido ao seu alto teor, o carbono é o principal elemento químico encontrado no carvão.

O carvão é avaliado de acordo com suas características físicas e químicas, divididas em dois critérios: “grade” e “rank”. A “grade” diz respeito ao teor de matéria mineral (cinzas) presente no carvão, e o “rank” é a medida do grau de maturidade (EPE, 2015). Assim os carvões com alto conteúdo de carbono (betuminoso e antracito) são considerados aqueles de maior qualidade, e os de baixo conteúdo de carbono (sub-betuminoso e linhito) carvões de menor qualidade e usados basicamente para produção de energia elétrica.

As reservas mundiais de carvão são estimadas em 847,5 bilhões de toneladas (ANEEL, 2008). No Brasil, considerando as reservas indicadas e inferidas, ou seja, os recursos praticamente inexplorados, somam-se cerca de 17 bilhões de toneladas de carvão (DNPM, 2010). Porém, as reservas lavráveis, ou seja, aquelas reservas que são economicamente viáveis, possuem em torno de 2,5 bilhões de toneladas (DNPM, 2010). O Rio Grande

do Sul representa 89,25% das reservas nacionais, seguido de 10,41% em Santa Catarina, 0,32% no Paraná e 0,02% em São Paulo, sendo que somente a jazida de Candiota no Rio Grande do Sul representa 38% do carvão nacional (ANEEL, 2008).

Candiota localiza-se a cerca de 400 km de Porto Alegre (acesso pela BR 116 e 293) e a aproximadamente 160 km de Pelotas (acesso pela BR 293). A mina de Candiota pertence à empresa de economia mista Companhia Riograndense de Mineração (CRM), controlada pelo Governo do Rio Grande do Sul e criada em 1969. A jazida de Candiota possui cerca de 2 bilhões de toneladas de carvão (BRASIL, 2019), sendo esta a principal jazida carbonífera brasileira, pois além de possuir grande quantidade de carvão, apresenta suas camadas de forma espessa e continua, em até 50 metros de profundidade, o que facilita a exploração a céu aberto. A mineração a céu aberto possui potencial de degradação de 2 a 11 vezes maior que a mineração em subsuperfície (LI, 2006).

O tipo de carvão ali encontrado é sub-betuminoso e de alto teor de cinzas. O carvão sub-betuminoso é caracterizado pelo teor elevado de umidade e baixo teor de carbono, ao passo que o teor de impurezas presentes afeta também o poder calorífico, o que lhe confere uso industrial e para produção de energia elétrica. A composição em base seca do carvão oriundo da jazida de Candiota apresenta umidade total de 16%, 52,7% de cinzas, 21,20% de material volátil, 26,10% de carbono fixo, 1,3% de enxofre total e poder calorífico superior de 3.262% (CRM, 2018).

Segundo o Balanço Mineral Brasileiro (2001), o carvão retirado é considerado de baixa qualidade, não permitindo que seja beneficiado e nem transportado, devendo assim ser utilizado em Run-of-Mine (ROM), ou seja, como carvão bruto, sem beneficiamento e na boca da mina.

4.2 Solos degradados pela mineração de carvão

Para que se chegue ao carvão é necessário fazer a retirada das camadas que o antecedem. O sistema é conhecido como sistema “vaivém” e segue a seguinte sequência: a) retirada do solo superficial (horizonte A); b) retirada dos horizontes B e C (constituído de argila); c) perfuração e detonação do arenito; d) descobertura do carvão através de uma *walking-drag-line*; e)

perfuração, detonação e extração do carvão do banco superior (BS) e do banco inferior (BI), com separação do argilito intermediário; f) recomposição topográfica, constituída pelos materiais de cobertura, com ou sem o aproveitamento de vazios para deposição de cinzas; g) deposição da “terra vegetal” sobre a área recomposta topograficamente; h) estabelecimento de práticas agronômicas de preparo, conservação e correção do solo; e i) plantio de espécies vegetais (SCHULTZE, 1998).

Após o término da extração do carvão os rejeitos e o estéril retornam a cava, originando o solo construído que, segundo Mukhopadhyay et al. (2014), são solos considerados jovens pedologicamente, e a recuperação dos atributos físicos, químicos e biológicos dependerá da intensidade da reposição vegetal na área minerada. Porém durante o processo de reconstrução ocorre à mistura dos horizontes, sendo esta a razão pela qual as propriedades dos solos construídos variam em distâncias menores do que as do solo natural (SCHAFER, 1980). A deficiência no processo de reconstrução do solo, oriunda do alto custo (LUNARDI NETO et al., 2008) e da dificuldade de fiscalização, resultam na contaminação destes solos pela presença dos resíduos de carvão (BITENCOURT et al., 2015).

O estéril é o material escavado, ou seja, a camada inicial de solo que precisa ser removida para que se chegue ao carvão, e representa um dos principais resíduos sólidos gerados na atividade de mineração. Sabe-se que a gênese do carvão se dá em ambientes impermeáveis e redutores, e nestes ambientes com características redutoras são formados também os sulfetos, principalmente o sulfato de ferro (FeS_2), que pode estar na forma de pirita. Durante o processo de mineração há a exposição desses sulfetos ao O_2 atmosférico, assim ocorre a reação de oxidação da pirita com produtos ácidos, H_2SO_4 (FINKELMAN; GROSS, 1999), gerando o processo conhecido como drenagem ácida, que provoca a poluição dos recursos hídricos e inibe a revegetação da área. Isto porque a acidez ($\text{pH} < 3,5$) gerada causa deficiência de nutrientes as plantas e metais em concentrações tóxicas (NUNES, 2002; DANIELS; ZIPPER, 2010; CHEN et al., 2013). Além do solo, os recursos hídricos e a qualidade do ar também sofrem influência direta e negativa do processo de mineração de carvão, o que pode contribuir para o

desaparecimento da fauna e da flora dos ecossistemas locais (BORTOT & ZIM-ALEXANDRE, 1995).

Segundo Fischer e Fischer (2006) a mineração a céu aberto é uma das formas, se não a principal, de degradação do ambiente pelo ser humano, a extensão do impacto gerado depende da técnica de extração, da composição física e química e dos minerais presentes no solo, além do método de recuperação utilizado (SHRESTHA, LAL, 2006).

Após a reconstrução, os solos apresentam alto grau de compactação oriundo do trânsito intenso de máquinas pesadas, gerando aumento significativo na densidade do solo, que por sua vez gera diminuição do espaço poroso, diminuição do crescimento e exploração radicular, redução de água disponível e limitação a absorção de nutrientes (SEYBOLT et al., 2004; STUMPF et al., 2014a). Segundo Ganjegunte et al. (2009) quando jovens, os solos construídos apresentam redução de mais de 70% no carbono orgânico e cerca de 65% no nitrogênio, quando comparados ao solo original. Os solos construídos mais antigos apresentam maior lixiviação de cátions básicos (Ca, Mg, K e Na) e maior concentração de H^+ e Al^{3+} , em função do maior tempo de exposição dessas camadas ao oxigênio e maior percolação da água ao longo do tempo; sendo assim a tendência é que o pH das camadas superiores do perfil seja menor (ALBERT, 2018).

Segundo Moreira e Siqueira (2002) os atributos biológicos do solo são os primeiros a serem afetados pela degradação ambiental oriunda do uso inadequado do solo, seguido pela degradação física e química, afetando assim sua qualidade. Em áreas degradadas, a matéria orgânica do solo (MOS) encontra-se geralmente em níveis baixos, representando uma perda das funções vitais do solo (HOLANDA NETO, 2011). Assim como a mistura dos horizontes no momento da reconstrução do solo afeta a MOS, a mineração reduz potencialmente a biomassa microbiana do solo (SIQUEIRA et al., 2008).

Como medida para mitigar os impactos ambientais gerados, o uso de cobertura vegetal visa não somente a recuperação da paisagem local, mas também o controle dos processos erosivos e das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (BUGIN, 2002; KITAMURA et al., 2008; ZHANG et al., 2015).

Em áreas onde há degradação pela remoção da cobertura vegetal e também das camadas do solo, busca-se a recuperação das mesmas pela revegetação, uma vez que há inter-relação da vegetação com a morfologia, química e biologia do solo (ALVES; SOUZA, 2008; AMARAL et al., 2012).

Para Pinto e Kampf (2002) o processo de reversão do ambiente degradado pela mineração, para um ambiente onde volte a prevalecer o equilíbrio, só é possível através da correção da acidez, controle da erosão pelo manejo adequado do solo associado ao rápido estabelecimento de cobertura vegetal e manutenção desta cobertura ao longo do tempo. Segundo Stumpf et al. (2014) o processo de reabilitação dessas áreas é lento, pois o alto grau de degradação ocasionado pela extração do carvão associado a recuperação topográfica acaba afetando a qualidade estrutural do solo. Pauletto et al. (2016) afirma que os atributos químicos e físicos do solo são recuperados em primeiro lugar, para depois poder recuperar os atributos biológicos e sua funcionalidade.

Santos (2006) estudando solos construídos após a mineração no RS, relata a proteção ao solo proporcionada pela utilização de gramíneas, uma vez que o tapete formado, tanto pelo sistema radicular quanto pela parte aérea, atenua os danos causadas pela chuva, impedindo o escoamento superficial das partículas do solo, dos nutrientes e também da MOS. Destacam-se inúmeros estudos sobre o efeito da revegetação na área minerada de Candiota sobre os atributos químicos, físicos (STUMPF et al., 2014; 2014a; BITTENCURT, 2015; STUMPF et al., 2016) e biológicos destes solos construídos (STUMPF et al., 2018).

4.3 Geração de resíduos associados a produção de energia em termelétricas

Segundo a World Coal Association (2018) o carvão tem papel vital na produção de energia elétrica em todo o mundo, sendo responsável por 37% da energia global e estima-se que até 2030 represente até 50%.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) elaborou o Estudo de Demanda Energética 2050 e de acordo com este, entre 2013 e 2050 a demanda energética brasileira irá dobrar, tornando-se inevitável a utilização da energia vinda das usinas termelétricas de carvão (EPE, 2015).

A Usina Termelétrica Presidente Médici (UTPM), localizada em Candiota/RS, possui 3 Fases construídas: Fase A com duas unidades com capacidade de 63 MW cada, inaugurada em 1974; a Fase B com duas unidades com capacidade de 160 MW, que entrou em operação em 1986, e a Fase C, de janeiro de 2011, com capacidade de 350 MW, totalizando assim 796 MW de capacidade instalada na UTPM (CGTEE, 2018). A construção da Fase C da usina duplicou o consumo de carvão mineral no Rio Grande do Sul, o que representa maiores impactos ambientais no solo e na água durante a extração do carvão, mas principalmente devido às emissões aéreas durante a queima do combustível, sendo determinante a instalação de equipamentos que minimizem e controlem estas emissões.

Durante o licenciamento ambiental foram determinados os padrões de emissão atmosférica de limite de 1700 mg/Nm³ para SO₂; 680 mg/Nm³ para NO_x e material particulado de 265 mg/Nm³ (80% da capacidade de operação) e 100 mg/Nm³ (45% da capacidade de operação) (CGTEE, 2018).

Para o atendimento dos padrões de emissões de NO_x são utilizados queimadores de baixa emissão destes gases, reduzindo a oxidação de N₂ no ar através do controle da temperatura de combustão. Já para a diminuição da emissão de partículas foram instalados dois precipitadores eletrostáticos que captam as partículas com alto poder de coesão e eficiência de até 99,96% (CGTEE, 2012). Para o controle da emissão de SO₂ tem-se o processo de dessulfurização dos gases de combustão do tipo semi-seco, utilizando cal virgem como agente dessulfurizante.

Da queima do carvão propriamente dita e dos métodos utilizados para controle de emissões resultam os chamados Produtos da Combustão do Carvão (PCC) ou *Coal Combustion Products* (CCP), considerados potencialmente prejudiciais ao meio ambiente (TEIXEIRA, et al, 2015). Estes resíduos são inorgânicos e divididos em duas categorias: a) partículas grosseiras: Cinzas (*Bottom ash*) e Escória da caldeira (*Boiler slag*); b) partículas finas: Cinza volante ou cinza leve (*Fly ash*); e ainda FGD (*Flue Gas Desulfurization*) material oriundo da limpeza dos gases (KALYONCU; OLSON, 2001).

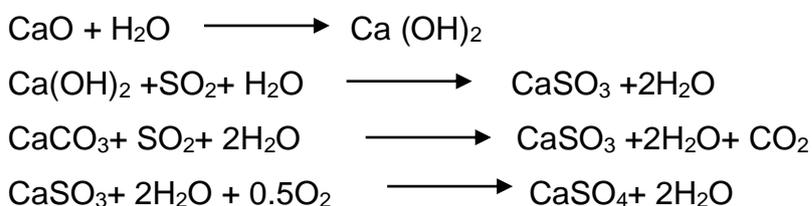
Com a estimativa crescente da produção de energia elétrica através das usinas termelétricas o acúmulo destes produtos tende a aumentar pelo mundo,

fazendo-se necessário buscar alternativas para a utilização dos mesmos, uma vez que constituem potencial agravamento nos problemas ambientais. Como a granulometria e composição química variam em cada um dos produtos, as possibilidades de uso se dão nas mais diversas aplicações: desde a construção civil até uso na agricultura.

Durante o processo da queima do carvão é liberado SO_2 que reage com a água e o oxigênio presentes na atmosfera gerando H_2SO_4 , precipitando na forma de chuva ácida (CASTRO, 2016). Sendo assim, a remoção do SO_2 é de extrema importância e uma preocupação mundial nas termelétricas de carvão. Para isso, durante o processo de dessulfurização o SO_2 é separado da corrente de gases através do contato com um absorvente ou adsorvente que pode ser injetado diretamente na caldeira de combustão, em um duto de saída da caldeira ou ainda em uma unidade projetada para este fim (SANTOS, 2006).

Na UTPM o processo de dessulfurização utilizado é o semi-seco, empregando CaO (cal virgem) como adsorvente, gerando um produto seco (CGTEE, 2012). São utilizados Lavadores de Leito Fluidizado Circulante (CFB – *Circulating fluid bed*), o equipamento é de fácil manutenção e operação, podendo o processo atingir até 97% de eficiência na remoção do dióxido de enxofre (SANTOS, 2006).

O principal produto gerado via dessulfurização semi-seca é rico em CaSO_3 (sulfito de cálcio) que pode ser oxidado a CaSO_4 quando em contato com a água (CASTRO, 2016). A seguir são apresentadas as reações que ocorrem em um processo de FGD baseado em CaO ou CaCO_3 (CÓRDOBA, 2015):



Segundo informações da CGTEE (2018), quando a usina se encontra em pleno funcionamento, são produzidos por dia, cerca de 900 toneladas deste resíduo. Wu et al. (2011) apontam alguns usos para o resíduo sólido gerado através da dessulfurização feitos nos Estados Unidos da América como

preenchimento de aterros e minas, estabilização de resíduos, modificação e estabilização de solos, entre outros. Há relatos da utilização desse material como fertilizante para plantas na Alemanha, Dinamarca e Áustria, e também como substituto a materiais que contenham cálcio e magnésio para neutralização de solos (HEIDRICH, et al., 2013).

4.4 Potencial da utilização de resíduos da dessulfurização (FGD-gesso) na recuperação de solos degradados

É comum que, devido ao elevado volume produzido, os Produtos da Combustão do Carvão (PCC's) sejam acondicionados próximos aos estéreis das minas de carvão, já que estas geralmente encontram-se próximas as termelétricas. Dentre os mais diversos usos dos PCC's existe a possibilidade da utilização destes materiais para recuperação de áreas degradadas, o que beneficia a mitigação da degradação causada à própria mina.

Na mina de carvão estes produtos apresentam algumas potenciais aplicações como: condicionador de solo, agente alcalinizante, neutralizar ou precipitar compostos oriundos da acidez do solo, mitigar a drenagem ácida e até mesmo o preenchimento da mina após o término da escavação (SKOUSEN, 2012).

A drenagem ácida é o fenômeno que ocorre quando há oxidação da pirita (FeS_2), tornando o ambiente extremamente ácido ($\text{pH} < 3,5$) o que caracteriza um grande problema ambiental devido a contaminação dos recursos hídricos. A adição de materiais alcalinos auxilia na atenuação dos efeitos da acidez, pois ocorre o aumento do pH, e este aumento faz com que haja a precipitação, na forma de carbonatos e hidróxidos, de muitos metais que se encontram presentes na solução (JOHNSON; HALLBERG, 2005). Estudos conduzidos nos Estados Unidos da América utilizaram o resíduo da dessulfuração dos gases como agente alcalinizante e observaram redução significativa na drenagem ácida (HAMRIC 1993; SCHUECK et al 1996; LIU; LAL 2013).

Além disso, por este material apresentar características semelhantes ao gesso agrícola, estudos apontam que a aplicação de FGD-gesso pode vir a contribuir com a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (CAIRES et al., 2011; DESUTTER et al., 2014), o que justifica ainda mais sua utilização nas áreas degradadas pela mineração de carvão. Segundo

Schafer (1980) as propriedades dos solos construídos variam em curtos espaços devido a mistura de horizontes na hora da reconstrução, o que prejudica a revegetação dessas áreas. Ainda, devido à dificuldade do estabelecimento de plantas, esses solos acabam permanecendo sem cobertura vegetal o que contribui para os processos erosivos.

O FGD-gesso surge como material capaz de atenuar alguns dos efeitos adversos ocasionados pela mistura de horizontes e perda de solo, atuando como condicionador de solo e com potencial de reduzir as perdas de Fósforo (P), dada a conversão do P em formas menos solúveis, além de Nitrogênio (N) e Carbono (C) (NORTON, 2008; USEPA, 2008; BALIGAR et al., 2011; ENDALE et al., 2014).

Rhoton e McChesney (2011) observaram também que além de auxiliar na agregação do solo, a aplicação de FGD-gesso gerou incremento significativo nas concentrações de Cálcio (Ca) e Enxofre (S) nas camadas subsuperficiais do solo, ao passo que também diminuiu as concentrações de Alumínio (Al) trocável em profundidade, que antes da aplicação apresentava concentração tóxica ao desenvolvimento das raízes das plantas.

O aumento das concentrações de Ca e S em profundidade, além do fornecimento propriamente dito destes dois nutrientes, também reduz a disponibilidade de alguns elementos prejudiciais ao desenvolvimento radicular (Al, Ferro (Fe), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Chumbo (Pb)), devido ao aumento de pH gerado após a aplicação do FGD-gesso, e ao mesmo tempo aumenta a disponibilidade de outros nutrientes como P, Zinco (Zn), Cobre (Cu) e Molibdênio (Mo), promovendo o ambiente ideal para o desenvolvimento das raízes em maior profundidade no perfil do solo (CLARK et al., 2001; BALIGAR et al., 2011).

4.5 Potencial agrônômico da utilização de resíduos da dessulfurização (FGD-gesso) na agricultura

Pelo pH elevado (~12,5) e pelo alto conteúdo de Ca e S, o FGD-gesso é sugerido como corretivo da acidez do solo e ainda pode ser utilizado como fonte de Ca e S para os solos deficientes (CARLSON; ADRIANO 1993), como agente alcalinizante, devido a sua capacidade de alterar o pH do solo, e também pode

atuar como condicionador em solos que apresentam altos teores de Sódio (Na) (DESUTTER et al., 2014).

Em solos onde o valor do pH em água se encontra menor do que 5,5 é possível observar a presença de Al em forma trocável (CQFS-RS/SC, 2016), além disso também há maior solubilidade de Manganês (Mn) que são elementos limitantes ao desenvolvimento da maioria das culturas agrícolas (KOCHIAN, 1995). O pH baixo também acarreta na menor solubilidade de nutrientes essenciais ao crescimento das plantas tais como P, Ca, Mg, Zn e Cu, ao passo que aumenta a solubilidade de elementos fitotóxicos, como Cd e Cr (KABATA-PENDIAS; ADRIANO 1995).

Do mesmo modo que o calcário (CaCO_3) que é utilizado para elevar o pH do solo, os resíduos de FGD-gesso que contém agentes alcalinizantes, cal virgem (CaO) no caso do material oriundo da UTPM, apresentam bom potencial para também promover este aumento (CLARK et al., 2001). De acordo com Clark et al. (2001), pelo FGD-gesso ser formado basicamente por CaSO_4 , que é mais solúvel que o CaCO_3 , este acaba lixiviando até as camadas subsuperficiais do solo, auxiliando na melhoria do ambiente radicular superficial. Recomenda-se a calagem quando o pH do solo em questão encontra-se menor que o exigido pela cultura, ou seja, quando este se encontra abaixo do pH de referência, aquele, a partir do qual, a planta se desenvolve sem limitações químicas, pois a atividade dos elementos potencialmente tóxicos será diminuída (CQFS-RS/SC, 2016). Ainda, quando há utilização de FGD-gesso para este fim, o fato de alcançar camadas subsuperficiais no perfil do solo, eleva as concentrações de Ca e S promovendo a possibilidade de absorção dos nutrientes necessários em maior profundidade, já que a melhoria do ambiente influencia em maior crescimento das raízes, ao mesmo tempo em que diminui a atividade de Al e Mn, e incrementa a solubilidade de outros nutrientes necessários às culturas (CLARK et al., 2001; BALIGAR et al., 2011).

O S é considerado elemento essencial ao crescimento das plantas e faz-se necessário que esteja disponível em quantidades satisfatórias para que o metabolismo vegetal funcione de forma adequada (BROWN, 2018). Este nutriente apresenta diversas funções nas plantas, é componente de aminoácidos (cistina, metionina e cisteína), também está ligado às vitaminas biotina e tiamina, e por fazer parte de um grande número de reações e

compostos dentro da planta, a deficiência de S gera uma série de distúrbios metabólicos como: diminuição na fotossíntese e na atividade respiratória, diminuição na fixação livre e simbiótica do N_2 atmosférico; além de aumentar a resistência ao frio e à seca. Em suma, o enxofre desempenha inúmeras funções que irão determinar os aumentos na produção e a qualidade do produto obtido (VITTI et al., 2018). Vale ressaltar que a absorção de enxofre pelas raízes se dá na forma do ânion SO_4^{2-} (sulfato) e constitui a forma mais eficiente de obtenção de S, sendo assim, pelo fato de o FGD-gesso apresentar-se na forma de $CaSO_4$, a partir do momento que ocorre a dissociação, o S torna-se prontamente disponível para a planta, justificando ainda mais sua utilização.

Assim como o S, o Ca também desempenha funções cruciais no crescimento e desenvolvimento das plantas. O cálcio é componente da parede celular, atua na formação da lamela média e também na absorção de nutrientes definindo a permeabilidade e seletividade da membrana (LIMA et al., 2018). O cálcio é absorvido na forma de Ca^{2+} e deve estar prontamente disponível para a absorção radicular para que a planta possa desempenhar suas funções metabólicas corretamente (BROWN, 2018). Para que a disponibilidade de cálcio seja adequada é necessário que o solo não esteja ácido, pois a acidez acarreta na lixiviação dos cátions básicos, prejudicando o desenvolvimento da planta, gerando sintomas de deficiência e afetando particularmente os pontos de crescimento, como por exemplo a raiz, estas crescem pouco e geralmente escurecem e apodrecem (LIMA et al., 2018).

Os efeitos fisiológicos acarretados pela deficiência destes nutrientes são apresentados de forma clara na literatura e já existem estudos que apontam que, da mesma forma que o gesso agrícola, o FGD-gesso é capaz de incrementar as concentrações de ambos os elementos na solução do solo permitindo o pleno desenvolvimento das culturas (LEE et al., 2007; CHEN et al., 2009; WATTS; DICK 2014).

Dentre o mix energético, a produção de energia elétrica na China se dá predominantemente pela queima de carvão nas usinas termelétricas, gerando assim toneladas de FGD-gesso, porém neste mesmo País, trava-se uma grande batalha pela recuperação dos solos degradados e pela melhoria dos solos salinos (CHEN et al., 2015). Desse modo, a aplicação da tecnologia FGD-gesso nesses solos faria uso de dezenas de toneladas, auxiliando não somente

o escoamento deste resíduo, mas também ampliando as áreas passíveis de cultivo, beneficiando o desenvolvimento agrícola e melhorando a qualidade dos ecossistemas locais (WANG et al., 2017).

A aplicação de FGD-gesso em solos sódicos ou salinos tem tido sucesso e incrementado a produção (WANG et al., 2008), constituindo mais uma potencial utilização para este material (XU et al., 2005).

Quando adicionado ao solo o cálcio presente no CaSO_4 desloca os íons Na^+ dos sítios de troca melhorando a floculação e estabilidade, pois promove a agregação das partículas de argila levando a melhoria da estrutura do solo (RITCHEY 2000; USEPA 2008). Além do mais, se comparado aos outros métodos de remediação em solos sódicos e salinos, apresenta menor custo de aquisição e reação muito mais rápida (YANG; WANG 2014). Mao et al (2016) obtiveram resultados positivos após a aplicação de FGD-gesso, houve o decréscimo de pH, que em solos afetados por sais geralmente é alcalino, melhoria das propriedades químicas do solo em geral e a solubilidade de Na na camada superficial foi reduzida.

4.6 Metais pesados presentes no resíduo da dessulfurização (FGD-gesso) e seus potenciais impactos no solo e desenvolvimento de plantas

Elementos-traço apresentam massa específica maior que $5,0 \text{ g cm}^{-3}$ e são naturalmente encontrados no solo em concentrações que variam de μg a mg kg^{-1} (MARSOLA et al., 2005). A fonte destes elementos no solo pode ser tanto devido ao material de origem, ou minerais de origem secundária, podendo estar adsorvidos aos sítios de troca ou também dissolvidos na solução (OLIVEIRA et al., 1998), quanto oriundos da atividade antrópica. Segundo Guilherme et al. 2005 as fontes antrópicas geralmente estão associadas a mineração, queima de carvão, indústrias em geral e efluentes urbanos, enquanto o intemperismo das rochas e a lixiviação são os principais meios naturais de ingresso destes elementos no ambiente.

A distinção destes elementos-traço para os demais elementos tóxicos se dá não só pela sua não degradabilidade no ambiente, mas porque sua toxicidade é controlada por suas propriedades físicas e químicas, sendo assim a presença dos mesmos no ambiente pode causar bioacumulação na cadeia

alimentar gerando distúrbios metabólicos nos seres vivos (MEURER et al., 2017).

Elementos como Zn e Cu, que são essenciais às plantas, quando presentes em altos teores podem vir a causar impactos negativos nos ecossistemas (MARSOLA et al. 2005). As concentrações destes e de outros elementos-traço podem ser aumentadas devido a aplicação de insumos com intuito de correção da acidez do solo e também de suprimento nutricional (GUILHERME et al., 2005). Um dos principais fatores que tem prejudicado a qualidade dos solos é a contaminação, um problema que vem sendo comum no mundo todo (STOKES et al. 2006).

A composição do FGD-gesso varia de acordo com a eficiência do processo de dessulfurização e sob quais condições as reações estão ocorrendo e é esta variação que dificulta padronizar as dosagens e melhores formas de utilização deste material para que se tenha segurança ambiental em sua utilização (PUNSHON et al., 1999). É na cinza leve, que apresenta partículas muito pequenas, onde encontram-se as maiores proporções de elementos-traço potencialmente tóxicos (CARLSON; ADRIANO 1993), sendo assim, quando há mistura da cinza leve com o FGD existe a tendência de que a concentração de metais pesados no produto final seja maior. Do ponto de vista ambiental os elementos-traço que apresentam maior relevância são Arsênio (As), Bário (Ba), Boro (B), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Selênio (Se), Estrôncio (Sr), Vanádio (V) e Zinco (Zn) (MURARKA et al., 1993).

Apesar de elementos como Zn, Mn e Cu serem essenciais às plantas e aos animais, quando encontrados acima dos limites estipulados podem causar desequilíbrios ecológicos (PELOZATO, 2008). A absorção de Pb pelas plantas tem efeito negativo, causando alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas: inibição da germinação de sementes, redução da produção de clorofila, diminuição do crescimento (RIBEIRO et al., 2015).

A contaminação tanto dos solos como dos seres vivos por elementos-traço gerou e gera preocupações a nível mundial. No Brasil, a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), foi a primeira entidade a propor valores orientadores para elementos e substâncias potencialmente tóxicas ao solo (CETESB, 2001). Em 2009, foi estabelecida

uma legislação nacional sobre os teores permissíveis de metais presentes no solo (CONAMA 420, 2009). Na Tabela 1 encontram-se os valores orientadores estabelecidos pela lei CONAMA 420 (2009) (BRASIL, 2009).

Tabela 1. Valores orientadores de elementos-traço para solos brasileiros.

Elemento-traço	Investigação			
	Prevenção	Agrícola	Residencial	Industrial
		mg kg⁻¹		
As	15	35	55	150
Ba	150	300	500	750
Cu	60	200	400	600
Cr	75	150	300	400
Hg	0,5	12	36	70
Pb	72	180	300	900
Ni	30	70	100	130
Se	5	-	-	-
Zn	300	450	1.000	2.000

Fonte: CONAMA 420 (2009)

A disponibilidade dos metais no solo apresenta relação direta com pH do solo em questão (BARAUD, 2006; LOPES, 2009). Os metais mais disponíveis no solo de acordo com as condições de pH (KABATA-PENDIAS 2004) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Disponibilidade de metais em diferentes condições de solo.

Potencial redox	pH	Disponibilidade	
		Alta	Moderada
Oxidante	< 3	Cd, Zn, Co, Cu, Ni	Mn, Hg, V
Oxidante	> 5	Cd, Zn	Mo, Se, Sr, Te, V
Oxidante rico em Fe	> 5	Nenhum	Cd, Zn
Redutor	> 5	Se, Mo	Cd, Zn, Cu, Mn, Pb, Sr
Redutor com H₂S	> 5	Nenhum	Mn, Sr

Fonte: LE BOURLEGAT, 2011. (Adaptado de Kabata-Pendias, 2004).

A grande preocupação circunda o fato de que estes elementos podem contaminar a água e as plantas, passando a fazer parte da cadeia alimentar. B, As, Se e Mo são considerados os elementos potencialmente mais perigosos

(KORCAK, 1995) e geralmente apresentam maior disponibilidade em pH mais alto. Outro elemento que merece atenção é o mercúrio, pois a entrada desse elemento no ambiente se dá tanto pela emissão de gases durante a queima do carvão como pela exportação nos PCC's, porém a concentração de Hg no FGD-gesso é menor do que os níveis encontrados nos outros produtos (BALIGAR et al., 2011). Briggs et al (2014) conduziram experimento onde houve a aplicação de FGD-gesso em sistema convencional de manejo, ou seja, fez-se a incorporação do material ao solo, e observaram que, a curto prazo, não houve aumento significativo na concentração de Hg e este dispersou-se pelo perfil, sendo assim, a aplicação seguida de incorporação sugere que há menor chance de que este elemento seja levado para os cursos d'água via erosão ou escoamento superficial. Neste mesmo estudo, quando se comparou o solo testemunha ao que teve tratamento com FGD-gesso, não se observou diferença significativa no nível de Hg.

Sakai et al. (2004) não observaram efeito sobre o teor de metais pesados em grãos de milho após a aplicação de FGD-gesso. Liu e Lal (2013) fizeram uso de FGD-gesso para recuperação de áreas de extração de carvão e não observaram aumento significativo nas concentrações de metais pesados, constituindo material eficiente para melhoria da qualidade do solo da mina. Chen et al. (2015) também não observaram aumento significativo na concentração de metais pesados em solo sódico após aplicação de FGD-gesso, tendo os níveis permanecido abaixo dos limites estipulados. Burgess-Conforti et al. (2017) notaram que a concentração de selênio no tecido de *Cynodon dactylon* L. aumentou e por isso faz-se necessário observar os níveis permitidos deste elemento na planta, principalmente quando se fizer uso de FGD-gesso em pastagens.

Ademais, quanto a utilização deste material para seus diversos fins junto ao solo a curto prazo sabe-se que a concentração de metais pesados no solo é minimamente afetada e os níveis mantem-se abaixo dos limites detectáveis (BURGESS-CONFORTI et al., 2017; CLARK et al., 2001).

4.7 Atributos químicos de solo limitantes ao desenvolvimento de soja no Rio Grande do Sul

A cultura da soja (*Glycine max* L.) é um dos principais cultivos agrícolas no Brasil e no mundo. No Brasil na safra 18/19 a produção chegou a 115,1 milhões de toneladas, 3,5% a menos do que na safra passada, a área plantada foi de cerca de 35.875,8 mil hectares, com produção média de 3,2 toneladas por hectare (CONAB 2019). Na safra 18/19 o Brasil manteve-se em primeiro lugar como maior exportador de soja do mundo, exportando 75 milhões de toneladas de soja em grãos (CONAB, 2019). No Rio Grande do Sul a área plantada nesta mesma safra foi de 5.803,5 mil hectares, com média de produção de 3,2 toneladas/ha, chegando a um total de 18.677,8 mil toneladas produzidas (EMATER, 2019).

Os números relacionados a produção mostram a importância deste produto para a economia do país, e cabe ressaltar que inúmeras são as famílias brasileiras ligadas direta ou indiretamente a sojicultura, dado ao grande número de empregos gerados pela atividade, portanto para que se obtenha o maior potencial produtivo da cultura e siga-se nessa crescente, é necessário manter-se atento as necessidades da cultura.

A produtividade de uma cultura é definida pelas suas interações com o ambiente e com o manejo executado. A produtividade é diretamente influenciada pela época de semeadura, escolha da cultivar, densidade e espaçamento adequados (MAUAD et al., 2009), assim como pelo controle de plantas daninhas, doenças e pragas que acometem a lavoura.

Uma vez que a soja é uma das maiores commodities da atualidade, a demanda por novas tecnologias agrícolas que permitam melhorar a produtividade e a qualidade dos grãos produzidos, ao mesmo tempo em que se reduzem os custos de produção é grande (SOARES et al., 2011). Os pontos chaves para obtenção de bons resultados atrelados a busca pela expressão do potencial produtivo da cultura residem no melhoramento genético e no aprimoramento do manejo do solo e da cultura (EMBRAPA, 2015).

O cultivo no Brasil se dá em várias condições e ambientes diferentes, desde regiões frias até regiões quentes, variando altitude e longitude, e também o tipo de solo (EMBRAPA, 2017) levando mais uma vez a necessidade de manejos específicos de acordo com cada situação. Os solos brasileiros de

maneira geral são muito intemperizados, e por isso apresentam alto grau de acidez e baixa fertilidade natural (BISSANI et al., 2008), na região sul do país os solos são predominantemente ácidos.

A acidificação do solo inicia com a solubilização da rocha e posterior perda de cátions básicos, como Ca, Mg, K e Na, que são percolados no perfil, dando preferência a retenção de cátions de maior valência, como o alumínio, nos sítios de troca (MEURER et al., 2017). Teores elevados de Al e Mn são geralmente encontrados em solos ácidos, e por serem tóxicos as plantas, estes elementos prejudicam o rendimento das culturas. Haja visto a necessidade de correção da maioria dos solos e também a melhoria da fertilidade natural, os fertilizantes representam atualmente 28% do custo total da produção de soja no país (CONAB, 2016).

4.8 Soja em terras baixas

No sul do Rio Grande do Sul encontram-se os solos chamados de “solos de terras baixas” que são utilizados para a produção de arroz irrigado. A classe de solo predominante é o Planossolo, caracterizado pela presença de horizonte B plânico, apresentando desargilização intensa nos horizontes (A e/ou E) precedentes ao B, com restrições de permeabilidade, são solos mal drenados ou hidromórficos (EMBRAPA, 2006).

Por estarem posicionados nas cotas mais baixas da paisagem estes solos passam por períodos de saturação de água, de forma natural, e também devido ao alagamento durante a produção do arroz irrigado. As terras baixas são caracterizadas pela declividade de até 5% e altitude de até 50 metros; visando o cultivo da soja, 95% dos solos apresentam baixo pH (<6,0), 70% possuem teor de matéria orgânica baixo (<2,5 %), 90% apresentam deficiência de P e 55% têm deficiência de K (ANGHINONI; CARLOS, 2018).

Nos últimos anos têm-se utilizado a cultura da soja dentro do cenário de diversificação do uso das terras baixas, na safra 18/19 foram cultivados cerca de 322 mil hectares (IRGA, 2019), esta vem sendo inserida para auxílio no controle do arroz daninho, melhoria da qualidade do solo e também retorno econômico (ANGHINONI; CARLOS, 2018). Porém, diferentemente do arroz, a soja não é resistente ao excesso hídrico e, para que se obtenha sucesso na sucessão arroz/soja, é preciso atentar ao manejo do solo e da cultura uma vez

que ainda existem lacunas para o entendimento da fertilidade para culturas de sequeiro em ambientes de terras baixas.

Quando no cultivo do arroz, o solo permanece alagado e isto causa alterações no equilíbrio dos elementos e compostos do solo, fazendo com que o comportamento desses solos tenha particularidades. As alterações causadas podem ser de ordem física, biológica, eletroquímicas e químicas, sendo as principais: aumento do pH, aumento da disponibilidade de ferro, manganês, potássio, cálcio, magnésio e fósforo, que contribuem para a nutrição da cultura do arroz (PONNAMPERUMA, 1972). Porém, quando é feita a drenagem da área, para que seja feito o cultivo da soja, o ambiente que se encontrava reduzido (sem O₂), volta a se reoxidar e todas as reações que ocorreram durante o alagamento agora ocorrem no sentido inverso, e o solo volta a apresentar as propriedades que possuía antes da entrada d'água (BISSANI et al., 2008). Deste modo faz-se necessário adequar as condições do solo para o ideal fornecimento de nutrientes à cultura e também para que o pH se encontre na faixa ideal.

4.9 Utilização de gesso agrícola no solo

Pesquisas associadas ao uso do gesso agrícola como condicionador de solo e fonte de nutrientes para as plantas vem sendo conduzidas desde o século 18 (CROCKER, 1922).

A solubilidade do gesso (CaSO₄.H₂O) é cerca de 200 vezes maior que a do calcário (CaCO₃), isto permite que o Ca presente no gesso seja mais móvel e chegue a camadas mais profundas de solo; considerando os efeitos benéficos do calcário, estes limitam-se a camada de incorporação, diferentemente do gesso que apresenta o potencial de melhoria nas propriedades físicas e químicas ao longo do perfil (CHEN; DICK, 2011). Segundo Dias (1992) a composição média do gesso é de: S (17,7%), CaO (30,9%), F (0,2%) e P₂O₅ (0,7%).

O gesso agrícola é uma fonte solúvel de nutrientes essenciais às plantas (cálcio e enxofre), também contribui para melhoria das propriedades físicas do solo promovendo a melhoria da agregação, podendo também auxiliar na prevenção de dispersão das partículas, reduzir o encrostamento superficial e incrementar a infiltração de água no solo e seu movimento ao longo do perfil;

além de mitigar os efeitos tóxicos do alumínio, principalmente em subsuperfície (CHEN; DICK, 2011). O crescimento radicular das plantas geralmente é incrementado quando se faz a utilização de gesso devido a melhoria das propriedades do solo nas camadas subsuperficiais, o alcance de maiores profundidades pelas raízes aumenta a disponibilidade de água e nutrientes às plantas (CLARK et al., 1997). De acordo com Shainberg et al (1989) o gesso agrícola, através do incremento na concentração de Ca^{2+} e também da formação de compostos menos solúveis de Al decorrentes da interação com o íon sulfato (AlSO_4^+), melhora as condições subsuperficiais do perfil.

Devido as mudanças na composição dos fertilizantes e o decréscimo da deposição de S no solo, via atmosfera, nos últimos 30 anos, têm-se como resultado a diminuição da capacidade de suprimento de S pelo solo, sendo que em contrapartida as culturas estão aumentando seus rendimentos, e conseqüentemente suas exigências nutricionais, o que leva a maior remoção de S, resultando em solos deficientes em enxofre (SCHERER, 2001; CHIBBER, 2007; WATTS; DICK, 2014). Desse modo o gesso se apresenta como alternativa para suprimento de SO_4^{2-} e, também, de Ca^{2+} (BENNET et al., 2014).

Inúmeras são as pesquisas relacionadas ao uso de gesso agrícola em culturas de sequeiro, principalmente em sistemas de plantio direto, uma vez que a não incorporação do calcário ao solo restringe a ação do mesmo a camada superficial. Estas pesquisas demonstram incremento de produtividade após a aplicação de gesso em arroz (SORATTO et al., 2010), milho (CAIRES et al., 2004; CAIRES et al., 2011 PD; ZANDONÁ et al., 2015; FONTOURA et al., 2019) e soja (PAULETTI et al., 2014; ZANDONÁ et al., 2015; FONTOURA et al., 2019).

Este insumo não apresenta efeitos significativos no pH do solo, pois não libera íons capazes de fazer esta alteração, mesmo que aplicado em quantidades elevadas; porém o grande ganho que se tem é que em solos ácidos, o gesso reduz a atividade do Al^{3+} na solução do solo, devido a formação do AlSO_4^+ em sub superfície, devido ao aumento da concentração de Ca^{2+} e SO_4^{2-} , diminuindo a toxicidade de Al para as plantas (MEURER et al., 2017).

Como este insumo não apresenta potencial para alterar o pH do solo, ele também aparece como complemento ao calcário em solos com problemas de acidez subsuperficial e/ou deficiência de Ca e S. Zandoná et al., (2015)

observaram que a combinação de gesso e calcário em superfície aumentara a capacidade de troca de cátions na camada de 0-10 cm, além de que o gesso aumentou os teores de Ca, redistribuindo Mg para as camadas inferiores e diminuiu os teores de Al tóxico na camada de 20-40 cm. Rampin et al., (2013) obtiveram incremento no teor de S nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm após 1 ano de aplicação do gesso.

5. Capítulo 1 – Influência da aplicação de FGD-gesso sobre atributos químicos de solo e plantas de Aveia e Azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

5.1 Introdução

No Brasil existem aproximadamente 2370 minas em operação, preferencialmente a céu aberto, que abrangem uma grande diversidade de bens minerais (KOPPE, 2007). No Rio Grande do Sul as reservas de carvão apresentam em torno de 28,8 bilhões de toneladas (NASCIMENTO et al., 2002) e a mineração concentra-se, principalmente, em lavras a céu aberto (KOPPE, COSTA 2002).

A mineração de carvão a céu aberto constitui fonte altamente poluidora capaz de causar problemas ambientais de várias ordens. As lavras utilizadas nesse tipo de mineração envolvem a remoção de grandes volumes de solo e rochas para cada tonelada de carvão produzida; dessa forma, a falta de planejamento adequado da lavra assim como a recuperação da área degradada pode causar sérios impactos ambientais (KOPPE, COSTA 2002). O Brasil possui 6956 milhões de toneladas de reservas provadas de carvão (0,6% do mundo) (BP Statistical Review of World Energy, 2019), sendo a sua ocorrência concentrada principalmente nos estados do Rio Grande do Sul (28 bilhões de toneladas), Santa Catarina (3,3 bilhões de toneladas) e Paraná (104 milhões de toneladas) (ABCM, 2019). Em relação a oferta de energia no Brasil, o carvão representou 5,8% do total em 2018, sendo de 3,2% a participação do carvão na matriz elétrica (Balanço Energético Nacional, 2019).

O programa de recuperação ambiental das áreas mineradas inicia com a remoção e preservação das camadas superficiais do solo, chamado de “*topsoil*” na literatura internacional e de “terra vegetal” no jargão técnico da mineração no Brasil. Na mineração em fatias (strip-mining) o método de lavra mais utilizado na mineração do carvão no Brasil, o material (estéril) retirado pelo corte irá preencher a fatia minerada no corte anterior e no final o solo superficial (“*topsoil*”) será depositado na superfície no intuito de recompor a estratigrafia original do local (CETEM, 2008).

Porém, para que o processo de construção das áreas se desse de forma a atenuar os efeitos já causados pela retirada dos materiais do seu local de

origem, o ideal seria a separação de cada extrato presente para posterior realocação no formato original, o que não ocorre de forma adequada principalmente pelo alto custo (LUNARDI NETO et al., 2008). Assim, durante a reconstrução topográfica do local pode ocorrer a mistura de horizontes dando origem aos solos construídos, que variam suas propriedades em distâncias muito menores do que as dos solos naturais (SCHAFER, 1980). Os ambientes formadores de carvão mineral também favorecem a formação dos sulfetos, principalmente o sulfeto de ferro como a pirita (FeS_2). Durante o processo de mineração a exposição destes sulfetos ao O_2 atmosférico faz com que ocorra a oxidação da pirita e a formação de ácido sulfúrico, o que contribui para uma intensa acidificação do solo, fenômeno conhecido como drenagem ácida, que compromete os recursos hídricos próximos, assim como a revegetação das áreas dado ao baixo pH remanescente ($\text{pH} < 3,5$) (NUNES, 2002; SOARES et al., 2006).

Conforme a Resolução CONAMA 001/86 (BRASIL, 1986) há obrigatoriedade da recuperação das áreas degradadas pela extração de recursos naturais. O foco da recuperação destas áreas é proporcionar condições adequadas ao reestabelecimento e pleno desenvolvimento da vegetação. A transformação deste ambiente degradado para um ambiente “equilibrado” necessita da correção da acidez, controle da erosão através do adequado manejo do solo, estabelecimento rápido de vegetação assim como manejo das plantas de cobertura ao longo do tempo (BUGIN, 2002; PINTO, KAMPF, 2002).

Além do impacto causado pela extração propriamente dita, a queima do carvão mineral contendo sulfetos nas termelétricas libera gases contendo enxofre, que causam a chamada chuva “ácida”. Para a retirada do enxofre dos gases é feito um tratamento dos mesmos com calcário ou cal, resultando um subproduto, o FGD (*Flue Gas Desulfurization*). O FGD-gesso é um material rico em CaSO_4 , muito semelhante ao gesso agrícola, porém diferentemente do que ocorre com a aplicação do gesso, este material apresenta potencial para alterar o pH do solo, devido aos agentes alcalinizantes utilizados para a retirada do SO_2 da corrente gasosa no momento da queima do carvão (CARLSON; ADRIANO 1993; DESUTTER et al., 2014). De acordo com Baligar et al. (2011),

o alto conteúdo de Ca e S presentes no FGD-gesso também aporta esses elementos ao solo, ao passo que auxilia na correção da acidez.

Dessa forma, há uma lacuna no entendimento dos processos relacionados a utilização do FGD-gesso, um passivo ambiental, no sentido de avaliar a sua capacidade de melhoria do desenvolvimento de plantas em solos construídos provenientes do processo de mineração à céu aberto. Assim, o objetivo deste estudo foi, além de buscar alternativas para o uso do FGD-gesso junto as áreas de mineração, uma vez que este apresenta potencial para auxiliar na revegetação destas áreas, analisar os efeitos de sua aplicação nos atributos químicos do solo das áreas mineradas e na produtividade de aveia preta e azevém.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Local

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, no campus Capão do Leão – UFPel, no município de Capão do Leão – RS (latitude: 31° 46' 3" Sul e longitude: 52° 26' 55" Oeste), de abril a setembro de 2019.

5.2.2 Solos

Para condução do experimento foram coletados dois tipos de solo na Mina de Candiota (CRM), em Candiota – RS (latitude: 31° 33' 29" Sul e longitude: 53° 40' 21" Oeste), estes solos foram coletados em áreas construídas após a mineração. O solo descrito como "topsoil", é o horizonte A e, provavelmente, parte do AB do solo, repostado superficialmente após a reconstrução das áreas e que servirá de base para a revegetação, já o solo descrito como "Estéril" é o material anterior a camada de carvão (horizonte B, C, rochas) parte que precisa ser escavado e retirado. Os dois solos foram coletados em profundidade de 0 a 20 cm, utilizando pá de corte. Na Tabela 3 está apresentada a caracterização química inicial de ambos os solos.

A interpretação da análise de solo foi realizada de acordo com o Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, seguindo a classificação de disponibilidade de nutrientes para o Grupo 2 – Culturas exigentes (CQFS-RS/SC, 2016).

O “topsoil” consiste no horizonte superficial do solo retirado previamente na frente de mineração, antes de iniciar o corte, normalmente compreendendo uma camada de 40cm, que inclui o horizonte A propriamente dito e provavelmente uma parte do horizonte AB do Argissolo Vermelho Eutrófico típico, característico da área de mineração de Candiota (NUNES, 2002).

O estéril consiste numa mistura heterogênea de saprólito e rochas (siltitos, folhelhos, argilitos e arenitos, incluindo eventualmente carvão (Banco Louco)) que compõe a camada de cobertura do carvão aproveitado na jazida de Candiota, a camada Candiota. Essa mistura decorre do tipo de equipamento utilizado nessa mina, “*dragline*”, uma escavadora de grande porte, que não viabiliza a retirada seletiva dos materiais.

O solo foi seco ao ar e não foi moído, para que fosse preservada ao máximo sua semelhança estrutural com a do local de origem. Posteriormente foi acondicionado em vasos (volume: 3 litros).

Tabela 3. Caracterização química do “topsoil” e do Estéril e a interpretação da disponibilidade de nutrientes e da acidez para culturas exigentes conforme recomendação do Sul do Brasil.

Atributos químicos		Topsoil	Interpretação ¹	Estéril	Interpretação ¹
pH água		4,6		3,5	
SMP		5,7		5,2	
M.O	%	1,6	Baixo	4,28	Médio
Argila		30	Classe 3	34	Classe 3
CTC _{pH 7,0}		10,4	Média	27,7	Alta
CTC _{efetiva}	cmol _c	5,4		18,1	
H+Al	dm ⁻³	6,2		10,9	
Al		1,2		1,3	
P	mg dm ⁻³	1,0	Muito baixo	8,6	Baixo
K		51	Baixo	122	Alto
S		32,4	Alto	213	Alto
Ca	cmol _c	2,9	Médio	10,9	Alto
Mg	dm ⁻³	1,1	Alto	5,5	Alto
Cu	mg dm ⁻³	1,7	Alto	1,7	Alto
Mn		44,7	Alto	203,3	Alto
Zn		0,8	Alto	5,9	Alto
Saturação de Al	%	22,2		7,2	
Saturação de base		40		61	

5.2.3 Delineamento experimental e tratamentos

Os tratamentos utilizados no experimento têm como base a utilização do FGD-gesso, resíduo oriundo da Usina Termelétrica Presidente Médici, situada no município de Candiota – RS, partindo do pressuposto que o FGD-gesso apresenta potencial de correção da acidez presente nos diferentes componentes que formam o solo construído. A caracterização do resíduo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização química básica do FGD-gesso.

Parâmetros	Resultados
CaO (%)	28,54
MgO (%)	18,71
PN (%)	12,6
PRNT (%)	81,87
S (% m/m)	3,60

Para estimar o potencial de neutralização (PN) utilizou-se o método de peróxido de hidrogênio de O'SHAY et al. (1990) e adaptado por Pinto (1997). As modificações utilizam dissolução menos ácida e mais eficiente dos carbonatos, removidos com HCl 0,5M ao invés de 6M, sendo o PN determinado pela titulação do sobrenadante com NaOH.

O experimento foi constituído por 2 fatores: I – Solo e II – Dose de FGD-gesso, em duas culturas diferentes. Os tratamentos são apresentados na Tabela 5. As doses de FGD-gesso foram calculadas através do índice SMP (CQFS-RS/SC, 2016) e ajustadas para PRNT 81,87%. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados (DBC) com 4 repetições

Tabela 5. Tratamentos utilizados no experimento de casa de vegetação.

Tratamento	Dose FGD-gesso	
	Topsoil	Estéril
T1	0 SMP	0 SMP
T2	2 SMP ¹	2 SMP ¹

¹ SMP (CQFS-RS/SC, 2016).

Para o tratamento 2 as doses de FGD-gesso foram correspondentes a 4,7 e 8,15 toneladas por hectare, para o “topsoil” e para o Estéril, respectivamente, a aplicação foi realizada no mês de novembro de 2018. Ambos os tratamentos receberam suplementação de adubação potássica e fosfatada, foi adicionado o equivalente a 180 kg ha⁻¹ de K₂O e 170 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

No dia 1 de abril de 2019 foi realizada a semeadura de duas gramíneas de inverno, Aveia-preta (*Avena strigosa*), cultivar Embrapa 139, e Azevém (*Lolium multiflorum* L.), cultivar Baqueano, sendo adicionadas 8 sementes de cada gramínea por vaso. A escolha das gramíneas se deu pela necessidade de revegetar as áreas após a mineração, para que estas voltem a cumprir sua função no ambiente. No dia 27 de maio foi feita adubação nitrogenada de cobertura, aplicando 1 g de ureia por vaso, proporcional a 135 kg de N por hectare.

5.2.4 Determinações

5.2.4.1 Produtividade das culturas

O experimento foi conduzido de abril a setembro de 2019, tendo a colheita sido realizada no dia 6 de setembro. Para determinar a produtividade, foram colhidas todas as plantas de cada vaso, pesadas e posteriormente secas em estufa com circulação forçada de ar quente a 65-70°C, conforme descrito por Tedesco (1995). Após secas, sendo retirado cerca de 20% de umidade, as plantas foram pesadas novamente e tiveram sua produtividade determinada, tendo o resultado sido extrapolado para quilogramas por hectare de massa seca.

5.2.4.2 Análises químicas

5.2.4.2.1 Análises químicas de planta

Na parte aérea das plantas foi determinada a concentração de metais pesados (Zn, Mn, Fe, Al, Cu, Pb e Cr) bem como dos elementos K, Na, Ca, Mg, Se, Si e Ba, pela metodologia utilizada no Exercício Colaborativo CRM-Agro FT_012016 (2016), utilizando cerca de 250 mg de amostra, tendo esta sido decomposta posteriormente com 5 ml de HNO₃ 65% v/v bidestilado e 1 ml de H₂O₂ em bloco digestor com sistema de refluxo acoplado a tubos digestores. Os teores dos minerais foram quantificados pela técnica de Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Induzido por Micro-ondas (MIP OES), junto ao Laboratório de Metrologia Química - UFPel.

Na avaliação química das raízes, foram feitas duas digestões, uma com H₂O₂ e H₂SO₄, para determinação de macronutrientes (K, Ca e Mg) e outra nitro-perclórica (HNO₃ – HClO₄) para determinação dos micronutrientes (Zn, Cu, Mn, Fe e Na), seguindo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Os elementos K e Na foram determinados em um fotômetro de chama e os demais em equipamento de absorção atômica.

5.2.4.2.2 Análises químicas dos solos

Após a colheita do experimento, ambos os solos foram coletados e levados para a sala de preparo de amostras da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, onde foram secos ao ar, após a secagem foram destorroados e passados em peneira de 2 mm.

As amostras foram pesadas e a extração dos elementos foi feita através da solução P-A (HCl 0,05 M + H₂SO₄ 0,0125 M), também conhecida como Mehlich 1, seguindo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Foi feita a determinação dos elementos Al, Se, Zn, Si, Fe, Ba, Cu, Pb, Mn e Cr em analisador multielementar MIP OES, junto ao Laboratório de Metrologia Química - UFPel.

A determinação de Ca e Mg, foi feita em equipamento de absorção atômica, já a de K e Na foi feita utilizando fotômetro de chama, seguindo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995); as análises foram realizadas junto ao Laboratório de Química do Solo, do Departamento de Solos, da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel – UFPel.

5.2.5 Análise estatística de dados

Os resultados de produtividade, bem como os resultados obtidos nas análises químicas realizadas foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e às variáveis que apresentaram diferença significativa foi aplicado o teste de Tukey à 5% de probabilidade de erro, através do software WinStat 1.0.

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Atributos químicos de solo

As variáveis pH em água e pH SMP, sob cultivo de aveia, foram influenciadas tanto pelo solo quanto pelo tratamento aplicado (Tabela 6). Para pH em água, em ambos os tratamentos, os maiores valores desta variável foram obtidos junto ao “topsoil”. O maior valor de pH foi encontrado junto ao tratamento 2 (2 SMP) no “topsoil”, 5,6, tendo aumentado significativamente se comparado ao tratamento testemunha, que apresentou valor de pH 4,8. O comportamento do pH SMP ocorreu de forma similar ao do pH em água, sendo observada diferença estatística significativa entre os tratamentos no “topsoil”, passando de 5,8 em T1 para 6,4 em T2.

Tabela 6. Valores de pH em água e pH SMP para o “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- pH em água -----			
Topsoil	4,8 aB	5,6 aA	5,2
Estéril	3,5 bA	3,5 bA	3,5
\bar{X}	4,15	4,55	CV (%) 6,99
----- pH SMP -----			
Topsoil	5,8 aB	6,4 aA	6,1
Estéril	5,2 bA	5,2 bA	5,2
\bar{X}	5,5	5,8	CV (%) 3,66

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando analisadas as mesmas variáveis químicas de solo após o cultivo de azevém, no que diz respeito ao pH em água (Tabela 7), o “topsoil” foi o solo que apresentou maior média de pH, 4,9, enquanto o Estéril apresentou média de pH 3,5. A aplicação de FGD-gesso teve influência positiva sobre o pH, elevando o mesmo. O pH obtido na testemunha foi de 4,1 e após a aplicação

do resíduo, observou-se que o pH subiu para 4,4. A aplicação de T2 resultou em efeito positivo sobre o pH SMP, onde a média foi de 5,7, superando a testemunha (Tabela 7); ainda, o maior pH SMP está associado ao “topsoil”.

Tabela 7. Valores de pH em água e pH SMP para o “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{x}
----- pH em água -----			
Topsoil	4,8	5,1	4,9 a
Estéril	3,3	3,5	3,5 b
\bar{x}	4,1 b	4,4 a	CV (%) 5,8
----- pH SMP-----			
Topsoil	5,8	6,2	6,0 a
Estéril	5,0	5,2	5,1 b
\bar{x}	5,4 b	5,7 a	CV (%) 3,3

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observando os valores de pH em água obtidos, vê-se que o Estéril apresenta pH extremamente ácido, 3,50, revelando o processo de DAM. Do mesmo modo, o “topsoil” também apresentou baixo pH, porém, a aplicação de FGD-gesso elevou o pH em 14% no solo cultivado com aveia, e também apresentou diferença no solo cultivado com azevém, porém menor, de apenas 7%. Os dados de pH corroboram com o sugerido por DeSutter et al. (2014) sugerindo FGD-gesso como possível opção de corretivo de acidez.

O pH SMP também foi alterado pela aplicação do FGD-gesso, principalmente no “topsoil” cultivado com aveia, passando de 5,8 para 6,4, possivelmente a parte de correção da acidez seja um fator preponderante em relação a redução da acidez potencial do solo (H+Al), quantificada pelo SMP; e também pode ocorrer pela presença do SO_4^{2-} que acaba deslocando as oxidrilas dos coloides para a solução e ainda pela formação do par iônico Al^{3+} e SO_4^{2-} , mas em menor intensidade (CAIRES et al., 2003).

A pirita é formada através do processo de sulfidização, em solos e sedimentos costeiros em função da influência da água do mar, que é rica em enxofre, quando entra em contato com os manguezais e com os sedimentos submersos (FANNING; FANNING, 1989). Uma reação contrária se dá quando há exposição dessas rochas e sedimentos ao O_2 atmosférico ou condições

oxidantes, gerando o processo de sulfurização onde os materiais que contêm sulfetos são oxidados e formam ácido sulfúrico, desencadeando a acidificação das águas, a dissolução de metais, dando origem ao processo conhecido como drenagem ácida de mina (DAM) (FANNING; FANNING, 1989).

A composição química dos elementos trocáveis dos solos construídos demonstra a predominância dos cátions trocáveis Ca, Mg e Al, tanto nos estéreis quanto na terra vegetal ou argila, que por sua vez apresentam valores menores (SILVA, 2012). Segundo Silva, geralmente a capacidade de troca de cátions do estéril é de duas a três vezes mais elevada que a da terra vegetal ou argila, devido a presença de sais solúveis oriundos da sulfurização e/ou da maior atividade das argilas.

As reações decorrentes da DAM favorecem a lixiviação de cátions básicos (Ca, Mg, K), podendo provocar também deficiência de P, devido ao baixo pH do solo que acaba deixando este elemento indisponível, além de aumentar a concentração de metais como Al, Fe, Mn, Cu, Zn (PINTO, KAMPF, 2002; BITTENCOURT, 2015). Alguns estudos em solos com baixas concentrações de cátions trocáveis como Ca, Mg e K demonstram que a aplicação do FGD-gesso gera uma competição entre os cátions e o CaSO_4 pelos sítios de troca do solo, podendo promover a lixiviação dos nutrientes (ERNANI et al., 2006; JALALI, ROWELL, 2008).

Os teores de P em ambos os solos e tratamentos, bem como sob o cultivo de ambas as espécies vegetais, não apresentaram diferença significativa (Tabela 8 e 9).

Sob o cultivo da aveia, o K não foi alterado pela aplicação do FGD-gesso e apresentou maior teor associado ao Estéril, $96,1 \text{ mg dm}^{-3}$. Os teores de Ca, foram influenciados isoladamente pelos fatores, tendo a concentração deste elemento sido maior no Estéril, $11,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Houve incremento de cerca de 32% no teor de cálcio após a aplicação do FGD-gesso, passando de 5,9 na testemunha, para 8,7 em T2 (Tabela 8). Ainda na Tabela 8, é possível observar que o Mg se comportou da mesma forma que o Ca, onde o maior valor do elemento está junto ao Estéril, $6,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e também houve incremento em sua disponibilidade após a aplicação de T2, passando de 3,5 para $4,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Tabela 8. Teores de P, K, Ca e Mg no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- P (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	9,5	9,7	9,6 ^{ns}
Estéril	9,5	7,9	8,7
\bar{X}	9,5 ^{ns}	8,8	CV (%) 13,2
----- K (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	52,0	64,7	58,3 b
Estéril	100,0	92,2	96,1 a
\bar{X}	77 ^{ns}	78,5	CV (%) 25,7
----- Ca (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,3	4,9	3,6 b
Estéril	9,6	12,4	11,0 a
\bar{X}	5,9 b	8,7 a	CV (%) 19,9
----- Mg (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	1,4	1,6	1,5 b
Estéril	5,6	6,4	6,0 a
\bar{X}	3,5 b	4,0 a	CV (%) 21,8

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro. Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Solução extratora: Mehlich 1 – P e K; KCl – Ca e Mg.

Já sob cultivo de azevém, no que se refere ao K, foi observada maior disponibilidade do elemento no Estéril, 96,1 mg dm⁻³ (Tabela 9), mas não foram observadas diferenças quanto aos tratamentos aplicados. O Ca teve influência tanto do tipo de solo como do tratamento, observa-se que para os dois solos a aplicação do FGD-gesso resultou em incremento do teor de cálcio disponível, 38% no “topsoil” e 25% no Estéril (Tabela 9). O teor de Mg disponível foi afetado positivamente em T2, superando a testemunha em 20% (Tabela 9).

Tabela 9. Teores de P, K, Ca e Mg no “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- P (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	10,8	9,5	10,1 ^{ns}
Estéril	7,6	8,3	7,9
\bar{X}	9,2 ^{ns}	8,9	CV (%) 17,2
----- K (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	52,0	64,7	58,3 b
Estéril	100,0	92,2	96,1 a
\bar{X}	77,0 ^{ns}	78,5	CV (%) 25,7
----- Ca (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,2 bB	3,5 bA	2,8
Estéril	8,8 aB	11,7 aA	10,2
\bar{X}	5,5	7,6	CV (%) 7,8
----- Mg (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	1,4	1,4	1,4 b
Estéril	3,9	5,1	4,5 a
\bar{X}	2,6 b	3,2 a	CV (%) 18,8

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Solução extratora: Mehlich 1 – P e K; KCl – Ca e Mg.

Os teores disponíveis de P e K não foram afetados pela aplicação de FGD-gesso, diferentemente dos teores de Ca e Mg, corroborando com estudos conduzidos por Wendell e Ritchey (1996) que observaram o incremento de Ca²⁺ no solo após a aplicação do FGD-gesso. Endale et al. (2014) observaram incremento de até 47% nos teores de Ca e Mg após a aplicação do FGD-gesso. Segundo Silva (2002), há maior predominância de Ca trocável no Estéril, do que no “topsoil”.

O Na não foi alterado pela aplicação do tratamento e teve seu maior teor associado ao Estéril, 101,0 mg dm⁻³, após o cultivo da aveia (Tabela 10). Os teores de Fe também não foram influenciados pela aplicação do FGD-gesso e seu maior teor também está associado ao Estéril, 445,3 mg dm⁻³, enquanto no

“topsoil” apresenta teor de 117,7 mg dm⁻³ (Tabela 10). Quando relacionado o Zn com os solos, vê-se que o Estéril apresentou maior teor do elemento, 5,0 mg dm⁻³, enquanto o “topsoil” revelou teor de 2,6 mg dm⁻³; para ambos os solos (Tabela 10) os teores deste micronutriente encontram-se na classe de disponibilidade alta (> 0,5 mg dm⁻³). Já quando observadas as médias dos tratamentos, vê-se que houve incremento no teor deste elemento associado a aplicação de FGD-gesso, passando de 3,4 para 4,1 mg dm⁻³. No que se refere ao Si, para ambos os fatores não houve diferença estatística significativa.

Tabela 10. Teores de Na, Fe, Zn, Si, Al e Mn no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Na (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	66,5	67,5	67,0 b
Estéril	91,5	110,5	101,0 a
\bar{X}	79,0 ^{ns}	89,0	CV (%) 20,6
----- Fe (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	115,7	119,7	117,7 b
Estéril	421,9	468,7	445,3 a
\bar{X}	268,7 ^{ns}	294,2	CV (%) 13,8
----- Zn (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,3	2,9	2,6 b
Estéril	4,6	5,4	5,0 a
\bar{X}	3,4 b	4,1 a	CV (%) 13,5
----- Si (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	120,7	146,3	133,5 ^{ns}
Estéril	110,7	116,8	113,7
\bar{X}	115,7 ^{ns}	131,5	CV (%) 15,5
----- Al (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,9 aA	1,1 bB	2
Estéril	3,5 aA	3,3 aA	3,4
\bar{X}	3,2	2,2	CV (%) 23,3
----- Mn (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	68,5	70,3	69,4 b
Estéril	297,3	270	283,6 a
\bar{X}	182,9 ^{ns}	170,1	CV (%) 15,1

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Solução extratora: Mehlich 1.

No que se refere aos teores de Al presentes nos solos, esta variável foi influenciada por ambos os fatores do experimento (Tabela 10). Observa-se redução de cerca de 60,6% no teor do elemento após a aplicação do FGD-gesso no “topsoil”. Já para o Estéril não houve efeito significativo. No Estéril, o teor de Mn no solo foi de 283,6 mg dm⁻³, e as médias dos teores observados para ambos os solos não foram alteradas pela aplicação do FGD-gesso nos solos cultivados com aveia (Tabela 10).

No que diz respeito ao teor dos elementos após o cultivo do azevém, os teores de Na no solo não foram afetados por nenhum dos fatores (Tabela 11). Tanto o Fe como o Zn não apresentaram diferença entre T1 e T2, porém para ambos os elementos, os maiores teores estão associados ao Estéril (Tabela 11). O teor de Si (Tabela 11) não diferiu entre os solos testados, porém aumentou em T2, passando de 96,4 mg dm⁻³ para 114,9 mg dm⁻³.

Resultados interessantes foram observados sobre o Al (Tabela 11), onde vê-se que em T2 houve redução considerável do teor de Al disponível no solo, na testemunha o teor foi de 4,3 cmol_c dm⁻³ passando a 2,1 após a aplicação do FGD-gesso. Ainda, o teor de Al disponível no Estéril foi cerca de 2,6 vezes maior do que o presente no “topsoil”. O Mn apresentou maior concentração no Estéril nas duas doses do tratamento, se comparado ao “topsoil” (Tabela 11).

Tabela 11. Teores de Na, Fe, Zn, Si, Al e Mn no “topsoil” e Estéril sob cultivo de azevém, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Na (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	55,7	69,7	62,7 ^{ns}
Estéril	69,7	92	80,8
\bar{X}	62,7 ^{ns}	80,8	CV (%) 22,6
----- Fe (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	100,3	101,1	100,7 b
Estéril	463,5	516,7	490,1 a
\bar{X}	281,8 ^{ns}	308,9	CV (%) 21,5
----- Zn (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,2	2,8	2,5 b
Estéril	4,6	5,0	4,8 a
\bar{X}	3,4 ^{ns}	3,9	CV (%) 14,48
----- Si (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	95,1	127,4	111,2 ^{ns}
Estéril	97,8	102,4	100,1
\bar{X}	96,4 b	114,9 a	CV (%) 13,3
----- Al (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,8	0,75	1,8 b
Estéril	5,8	3,6	4,7 a
\bar{X}	4,3 a	2,1 b	CV (%) 22,2
----- Mn (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	57,9 bA	49,4 bA	53,6
Estéril	180,4 aB	239,6 aA	210
\bar{X}	119,1	144,5	CV (%) 15,4

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Solução extratora: Mehlich 1.

Apesar dos sais solúveis presentes no FGD estabilizado (BALIGAR et al., 2011) não houve efeito sobre o teor de sódio no solo após a condução deste experimento. Segundo Kosta et al. (2005) a maioria dos FGD's, oriundos das diversas tecnologias de retirada de SO₂ da corrente gasosa nas termelétricas,

apresentam concentrações elevadas de Ca, S, Al, Fe e Si. No solo onde houve cultivo de azevém, observou-se que o teor de Si no solo aumentou após a aplicação do FGD-gesso, corroborando com o estudo de Kosta. O Fe por sua vez não apresentou incremento nos teores.

As reações químicas originadas dos processos oxidativos de natureza ácida acabam liberando íons H^+ que intemperizam os minerais aluminossilicatos resultando em maior liberação de Al^{3+} para o meio, que atua também sobre a acidificação do pH (ALBERT, 2018). No presente estudo observa-se que a concentração de Al é maior no Estéril, devido à frente de acidificação que ocorre, porém resultados positivos são observados após a aplicação do FGD-gesso sobre o “topsoil” reduzindo em cerca de 50% o teor de Al disponível, resposta interessante uma vez que a revegetação das áreas se dá nesse solo. O $CaSO_4$ reage com o Al^{3+} precipitando-o na forma de $AlSO_4^+$ (NEIS et al., 2010; RAMPIM et al., 2013), além do mais, a aplicação mesmo que superficial do insumo gera movimentação do mesmo no perfil devido a percolação de água (CAIRES et al., 2004), atuando também na redução do Al tóxico em subsuperfície (RHOTON, McCHESNEY 2011; BLUM, CAIRES, ALLEONI, 2013) além da redução superficial (WENDELL, RITCHEY, 1996; CHEN et al., 2009).

O Mn por sua vez não apresentou redução significativa nos teores presentes nos solos após a aplicação do FGD-gesso, observou-se que a maior concentração do elemento se deu junto ao Estéril, uma vez que há maior liberação do elemento em pH menor que 4,5 (MALAVOLTA, 1979).

A aplicação dos produtos da combustão do carvão, especialmente o FGD-gesso podem ser utilizados como alternativa ao calcário, pois como visto promove redução na concentração de Al tóxico, além de poder atuar como fertilizante de solo, uma vez que é capaz de aportar nutrientes como Ca, Mg, Cu e Zn (BRAUER, 2005). Além disso, a aplicação de $CaSO_4$, ao passo que reduz a disponibilidade de alguns elementos tóxicos, aumenta a disponibilidade de outros que são benéficos, como o Cu e o Zn (BALIGAR et al., 2011).

Porém, apesar dos benefícios associados a utilização do FGD-gesso para cultivos agrícolas, existem preocupações associadas a presença de elementos traço em sua composição, como por exemplo Ba, Cr, Pb, Se, As (KOSTA et al., 2005; BALIGAR et al., 2011). Os elementos traço ocorrem de

forma natural no solo, porém suas concentrações podem ser elevadas devido a atividades antrópicas, trazendo consigo preocupações relacionados ao seu potencial impacto negativo sobre o homem e o ambiente. Alguns destes elementos apresentam essencialidade aos animais e a nutrição mineral de plantas, como o Zn, Mn e o Cu, porém quando excedem os limites permissíveis têm potencial de causar desequilíbrio no ecossistema (PELOZATO, 2008).

Após o cultivo de azevém, os metais Cu e Pb não tiveram sua disponibilidade afetada pelo tratamento aplicado, porém ambos se encontram em maior teor no “topsoil” (Tabela 12). Os metais pesados cromo e selênio não foram detectados nas amostras. O Ba foi influenciado pelos dois fatores e também apresentou maior teor associado ao “topsoil”, e teve sua disponibilidade diminuída após a aplicação do FGD-gesso, passando de 2,8 para 1,2 mg dm⁻³, redução bastante significativa, cerca de 55% (Tabela 12).

Tabela 12. Teores Cu, Pb, Cr, Se e Ba no “topsoil” e Estéril sob cultivo de avevém, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Cu (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,0	2,0	2,0 a
Estéril	1,3	1,5	1,4 b
\bar{X}	1,7 ^{ns}	1,8	CV (%) 22,7
----- Pb (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	1,6	1,6	1,6 a
Estéril	nd*	nd*	nd* b
\bar{X}	0,8 ^{ns}	0,8	CV (%) 21,1
----- Cr (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Se (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Ba (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	2,8 aA	1,2 aB	2,0
Estéril	0,3bA	0,4 bA	0,3
\bar{X}	1,5	0,8	CV (%) 16,3

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro; *não detectado. Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Solução extratora: Mehlich 1.

Posteriormente ao cultivo da aveia, o Cu foi encontrado em maior teor no “topsoil”, 2,2 mg dm⁻³ e, quando relacionado as médias dos tratamentos, apresentou incremento de cerca de 32% no teor após a aplicação de FGD-gesso, porém, este incremento não representa, na prática, algo necessário, uma vez que mesmo antes da aplicação o teor do elemento já se encontrava na classe de disponibilidade alta (> 0,4 mg dm⁻³) (Tabela 13). O chumbo por sua vez não foi detectado no Estéril, porém no “topsoil” apresentou teor de 1,3

mg dm⁻³. O Ba foi influenciado por ambos os fatores apresentando maiores concentrações no “topsoil”, no tratamento testemunha o teor encontrado foi de 1,6 cmol_c dm⁻³, após a aplicação de 2 SMP de FGD-gesso esse teor foi reduzido para 0,9 cmol_c dm⁻³, uma redução de 41% (Tabela 13). O teor no Estéril não foi influenciado pela aplicação do tratamento.

Tabela 13. Teores Cu, Pb, Cr, Se e Ba no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Cu (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	1,9	2,4	2,2 a
Estéril	1,0	1,7	1,3 b
\bar{X}	1,5 b	2,1 a	CV (%) 26,0
----- Pb (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	1,6	1,0	1,3 a
Estéril	nd*	nd*	nd* b
\bar{X}	0,82 ^{ns}	0,52	CV (%) 53,3
----- Cr (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Se (mg dm ⁻³) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Ba (cmol _c dm ⁻³) -----			
Topsoil	1,6 aA	0,9 aB	1,2
Estéril	0,4 bA	0,4 bA	0,2
\bar{X}	1,0	0,6	CV (%) 32,5

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro; *não detectado. Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).
Solução extratora: Mehlich 1.

No presente estudo, não se observou incremento nos teores de Pb, bem como nos teores de Ba após a aplicação do FGD-gesso, inclusive este metal apresentou tendência de diminuição no teor disponível após a aplicação do FGD-gesso no “topsoil”, uma redução de 41% no solo cultivado com aveia e 55% no cultivado com azevém. Tanto o teor biodisponível de Pb quanto o Ba, mantiveram-se abaixo do nível de prevenção estipulado em CONAMA 420/09, sendo estes valores 72 e 150 mg kg⁻¹, respectivamente.

O mesmo acontece para Cu e Zn, apesar de terem apresentado aumento na disponibilidade após a aplicação do FGD-gesso, ambos os elementos se mantiveram abaixo do nível de prevenção estipulado. Segundo Sloan et al. (1999), após a aplicação do FGD-gesso os metais Cu e Zn diminuem suas concentrações solúveis livres devido a transformação química que ocorre com estes elementos; de acordo com os autores, ocorre a transformação de Cu²⁺ e Zn²⁺, para Cu(OH)₂ e ZnOH⁺ e ZnCO₃, a diminuição da concentração destes elementos na forma prontamente disponível, gera um incremento da concentração dos mesmo no solo. Cr e Se não foram detectados nos solos mesmo após a aplicação do FGD-gesso.

Apesar da probabilidade de presença de metais pesados na composição do FGD-gesso, as concentrações, quando presentes, encontram-se em valores inferiores as concentrações estipuladas para presença no solo, por exemplo (EPRI, 2011; SMITH et al., 2013). O potencial de liberação destes componentes para as plantas através da aplicação no solo fora estudado e até então não foi considerado como uma preocupação ambiental (CHEN et al., 2014; BRIGGS et al., 2014).

Em relação a C.E., o maior valor foi encontrado no Estéril se comparado ao “topsoil”, porém não houve efeito da aplicação dos tratamentos sobre esta variável nos solos cultivados com aveia (Tabela 14). Já para os solos cultivados com azevém, a C.E. apresentou interação entre os fatores, houve aumento desta variável após a aplicação do FGD-gesso no Estéril (Tabela 14). Quando comparados os solos, o Estéril apresenta C.E. muito superior, evidenciando maior quantidade de sais presentes.

Tabela 14. Condutividade elétrica no “topsoil” e Estéril sob cultivo de aveia e azevém, sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
Aveia			
----- C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$) -----			
Topsoil	177,4	322,7	275,0 b
Estéril	2219,0	2325,0	2272,0 a
\bar{X}	1198,2 ^{ns}	1348,8	CV (%) 18,0
Azevém			
----- C.E. ($\mu\text{S cm}^{-1}$) -----			
Topsoil	170,7 bA	222,9 bA	196,8
Estéril	1768,0 aB	2368,2 aA	2068,1
\bar{X}	969,3	1295,5	CV (%) 12,6

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Mudanças na C.E. são inevitáveis em solos construídos devido a mistura dos horizontes e a DAM, resultando em menores valores de pH e maior C.E. (GANJEGUNTE et al., 2009). No estudo observa-se que a C.E. associada ao Estéril é cerca de 100 vezes maior do que no “topsoil”, segundo do Carmo e Silva (2016) os teores de elementos trocáveis, teores de alumínio, fosfato e sulfato, bem como a concentração de hidroxilas no solo regulam a C.E. Ainda, segundo Kampf et al. (1997), a maior C.E. presente no Estéril pode ser indicativo da formação de sulfatos solúveis oriundos do processo de sulfurização

5.3.2 Teores de elementos de parte aérea e raízes de plantas

Através do MIP OES foram determinados os teores de nutrientes presentes na parte aérea das plantas.

Na aveia, K e Ca apresentaram efeito isolados dos fatores (Tabela 15); o K não apresentou diferença significativa. Já o Ca apresentou diferença significativa entre os teores presentes nas plantas para os dois solos, onde a aveia cultivada no “topsoil”, acumulou $3,3 \text{ g kg}^{-1}$, 50% a mais do que o acumulado no Estéril; no que se refere ao tratamento utilizado, em T2 (2 SMP) apresentou maior teor de Ca na planta. Para a variável Mg, houve interação

entre os fatores quando analisados os teores acumulados após o cultivo da aveia no Estéril, observa-se que houve um incremento de 28% no acúmulo do nutriente com a aplicação do FGD-gesso (Tabela 15).

Tabela 15. Teores de K, Ca, Mg na parte aérea de plantas de aveia e azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão sob aplicação de FGD-gesso.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
Aveia			
----- K (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	10,4	7,9	9,1 ^{ns}
Estéril	8,4	7,5	7,9
\bar{X}	9,4 ^{ns}	7,7	CV (%) 24,33
----- Ca (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	3,2	3,5	3,3 a
Estéril	1,2	2,4	1,8 b
\bar{X}	2,2 b	2,9 a	CV (%) 19,6
----- Mg (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	1,6 aA	1,4 bA	1,5
Estéril	1,4 aB	2,0 aA	1,7
\bar{X}	1,5	1,5	CV (%) 13,0
Azevém			
----- K (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	15,7 aA	13,2 bA	14,4
Estéril	13,7 aB	18,9 aA	16,3
\bar{X}	14,7	16,0	CV (%) 17,7
----- Ca (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	3,5 aA	2,2 bB	2,8
Estéril	2,0 bB	3,9 aA	2,9
\bar{X}	2,7	3,0	CV (%) 14,1
----- Mg (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	1,7	2,0	1,8 ^{ns}
Estéril	2,8	2,0	2,4
\bar{X}	2,2 ^{ns}	2,0	CV (%) 33,5

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Para o azevém, tanto o K quando o Ca apresentaram menor acúmulo nas plantas cultivadas no “topsoil” no tratamento em que houve adição de FGD-gesso (Tabela 15). Já no Estéril, diferentemente do que ocorreu no “topsoil”, a aplicação de FGD-gesso potencializou o acúmulo dos elementos no tecido vegetal (Tabela 15). O Mg apresentou efeito isolado dos fatores, não apresentando diferença significativa (Tabela 15).

A aplicação de FGD-gesso resultou em maior acúmulo de Ca para a aveia se comparada a testemunha, um aumento de 25% no teor encontrado na parte aérea. O azevém por sua vez, quando cultivado no “topsoil” com FGD-gesso, apresentou decréscimo na concentração de Ca, já no Estéril o incremento de Ca foi de 47% se comparado a testemunha. Corroborando com Knox et al. (2006), a aplicação de FGD-gesso aumentou a absorção de Ca pelas plantas. O Ca é mensageiro secundário na regulação metabólica da planta, constituinte da lamela média das paredes celulares e também atua como responsável pelo estímulo ao crescimento radicular (TAIZ et al., 2017).

Para a aveia os teores de Mg no “topsoil” não apresentaram diferença, assim como os teores de K para os dois solos estudados. Já para o azevém, o Mg também não apresentou diferença, o K por sua vez apresentou acréscimo de 27% nas plantas cultivadas no Estéril. De maneira geral, o FGD-gesso apresenta capacidade de aumentar a absorção de macronutrientes pelas plantas, como Ca, Mg e K, desde que não aja aporte excessivo de Ca, uma vez que se gera desequilíbrio nas relações de Ca:Mg, induzindo menor absorção de Mg e K pelas culturas (KNOX et al., 2006).

O acúmulo de Na nas plantas de aveia não diferiu quando relacionado ao tratamento, mas sim quanto ao solo, no “topsoil” foi encontrado o maior teor, 4547,9 mg kg⁻¹, cerca de 39% a mais do que no Estéril (Tabela 16). Já o Fe não teve diferença estatística significativa entre os solos (Tabela 16). No que se refere ao teor de Fe acumulado associado ao tratamento aplicado, em T2 a média chegou a 272,0 mg kg⁻¹, enquanto na testemunha a média foi de 73,7 mg kg⁻¹. As concentrações de Si na parte aérea das plantas não apresentaram diferença estatística, seja para o tipo de solo ou para o tratamento utilizado (Tabela 16).

No que diz respeito ao Mn, quando cultivada no Estéril a aveia acumulou 868,4 mg kg⁻¹, 490 mg a mais do que quando cultivada no “topsoil” (Tabela 16);

a aplicação do tratamento não causou alterações significativas nos teores de Mn. O acúmulo de Al na planta foi mais expressivo quando estas foram cultivadas no “topsoil”, alcançando 358,9 mg kg⁻¹.

O Zn apresentou interação dupla entre os fatores (Tabela 16), no “topsoil”, o teor inicial de Zn era menor do que o encontrado no Estéril, porém após a aplicação do FGD-gesso houve um acréscimo na concentração do elemento no tecido vegetal de 56,5%, passando de 18,6 para 42,7 mg kg⁻¹. Diferentemente, no Estéril houve uma diminuição no teor acumulado do elemento pela planta, passando de 40,2 para 21,4 mg kg⁻¹.

Tabela 16. Teores de Na, Fe, Si, Mn, Al e Zn na parte aérea de plantas de aveia cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Na (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	4610,6	4485,3	4547,9 a
Estéril	2623,5	2936,1	2779,9 b
\bar{X}	3617,1 ^{ns}	3710,7	CV (%) 24,1
----- Fe (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	78,4	323,4	200,9 ^{ns}
Estéril	69,0	220,8	144,9
\bar{X}	73,7 b	272,0 a	CV (%) 45,5
----- Si (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	198,9	184,4	191,7 ^{ns}
Estéril	203,2	205,5	204,3
\bar{X}	201,0 ^{ns}	194,9	CV (%) 8,7
----- Mn (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	418,2	333,8	376,0 b
Estéril	783,5	953,5	868,4 a
\bar{X}	600,8 ^{ns}	643,6	CV (%) 20,2
----- Al (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	201,9	515,9	358,9 a
Estéril	127,1	133,9	130,5 b
\bar{X}	164,5 b	324,9 a	CV (%) 64,7
----- Zn (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	18,6 bB	42,7 aA	30,6
Estéril	40,2 aA	21,4 bB	30,8
\bar{X}	29,4	32,05	CV (%) 34,9

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No azevém, Na e o Fe apresentaram menor acúmulo no “topsoil” onde houve adição de FGD-gesso (Tabela 17). A redução no acúmulo de Na foi de

mais de 72% (Tabela 17). Já no Estéril, o acúmulo de Na foi potencializado em T2, 68% a mais que na testemunha. O comportamento do Fe se deu semelhante ao do Na para os dois solos (Tabela 17). O Si apresentou efeito isolado dos fatores solo e tratamento, e não houve diferença estatística significativa (Tabela 17).

No que diz respeito ao Mn, no Estéril, a aplicação de FGD-gesso reduziu consideravelmente o acúmulo de Mn no tecido vegetal, passando de 1559,8 mg kg⁻¹ na testemunha para 487,2 mg kg⁻¹ em T2. No “topsoil” houve redução no teor de Al observado nas plantas de azevém cultivadas com FGD-gesso, a redução foi de cerca de 67% (Tabela 17).

A absorção de Zn também foi reduzida em T2 no “topsoil”, uma redução de cerca de 35 mg kg⁻¹; inversamente, no Estéril, as plantas acumularam mais Zn no tecido quando cultivadas em T2, o acréscimo foi de cerca de 36 mg kg⁻¹ (Tabela 17).

Tabela 17. Teores de Na, Fe, Si, Mn, Al e Zn na parte aérea de plantas de azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Na (mg kg⁻¹) -----			
Topsoil	4368,2 aA	1196,3 bB	2782,2
Estéril	1391,7 bB	4418,9 aA	2905,3
\bar{X}	2879,9	2807,6	CV (%) 24,1
----- Fe (mg kg⁻¹) -----			
Topsoil	280,0 aA	167,4 aA	223,7
Estéril	130,5 bB	261,2 aA	195,8
\bar{X}	205,2	214,3	CV (%) 37,0
----- Si (mg kg⁻¹) -----			
Topsoil	187,2	205,0	196,1 ^{ns}
Estéril	172,9	152,8	162,8
\bar{X}	180,0 ^{ns}	178,9	CV (%) 17,9
----- Mn (mg kg⁻¹) -----			
Topsoil	535,6 bA	917,0 aA	726,3
Estéril	1559,8 aA	487,2 aB	1023,5
\bar{X}	1047,7	702,1	CV (%) 55,6
----- Al (mg kg⁻¹) -----			
Topsoil	506,7 aA	164,2 bB	335,4
Estéril	255,8 aA	385,8 aA	320,8
\bar{X}	381,25	274,8	CV (%) 53,4
----- Zn (mg kg⁻¹) -----			
Topsoil	64,8 aA	29,8 bB	47,3
Estéril	38,2 bB	74,0 aA	56,1
\bar{X}	51,5	51,9	CV (%) 17,4

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em estudo conduzido por Malavolta et al. (1997), estes observaram que as concentrações de macro e micronutrientes na parte aérea das plantas não foi afetada pela adição de gesso agrícola ao solo, podendo este gesso ser comparado ao FGD-gesso utilizado no presente estudo.

Na cultura da aveia, os teores de Fe encontrados na parte aérea foram 72% maiores aos observados na testemunha, segundo Borkert et al. (2003) a aveia é uma planta eficiente na reciclagem de micronutrientes.

Soratto et al. (2008) não observaram influência sobre a concentração dos nutrientes em plantas de aveia preta após a aplicação de gesso agrícola ao solo, mesmo os teores de nutrientes tendo sido aumentados no solo. O mesmo foi observado por Caires et al. (2001) na cevada e por Caires et al. (2004) na cultura do milho.

As concentrações de Ba foram maiores nas plantas de aveia cultivadas no “topsoil”, onde houve o acúmulo de $8,4 \text{ mg kg}^{-1}$, já no Estéril as plantas acumularam $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 18). Já o teor de Pb era de $6,2 \text{ mg kg}^{-1}$ na testemunha do “topsoil” e não foi detectado após a aplicação de T2 (Tabela 18). O inverso foi observado para o Estéril, que sem aplicação de T2 não foi detectada presença de Pb e quando aplicado o teor encontrado foi de $9,1 \text{ mg kg}^{-1}$. Os elementos Cu, Cr e Se não foram detectados no tecido vegetal das plantas de aveia.

Tabela 18. Teores de Ba, Pb, Cu, Cr e Se na parte aérea de plantas de aveia cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Ba (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	6,13	10,7	8,4 a
Estéril	nd*	3,2	1,5 b
\bar{X}	3,0 ^{ns}	6,9	CV (%) 100,0
----- Pb (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	6,2 aA	nd*	3,1
Estéril	nd* bB	9,1 aA	4,5
\bar{X}	3,1	4,5	CV (%) 41,9
----- Cu (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Cr (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Se (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro; *não detectado.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nas plantas de azevém, o Ba teve sua concentração reduzida no tecido vegetal quando associado ao “topsoil” e T2, diferentemente do que aconteceu no Estéril, onde T2 potencializou o acúmulo do elemento (Tabela 19). O Pb por sua vez não foi detectado na testemunha do “topsoil”, e após a aplicação de FGD-gesso a concentração observada foi de 6,3 mg kg⁻¹; no Estéril o efeito foi inverso, a testemunha apresentava 12,7 mg kg⁻¹ de Pb e em T2 o elemento não foi detectado (Tabela 19).

Além dos elementos já descritos foram avaliados também Cu, Cr e Se, porém, não foram encontrados teores dos mesmos nas plantas de azevém cultivadas.

Tabela 19. Teores de Ba, Pb, Cu, Cr e Se na parte aérea de plantas de azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Ba (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	40,6 aA	6,3 bB	23,4
Estéril	nd* bB	37,7 aA	18,8
\bar{X}	20,3	22	CV (%) 22,3
----- Pb (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd* bB	6,3 aA	3,1
Estéril	12,7 aA	nd* bB	6,3
\bar{X}	6,3	3,1	CV (%) 2,9
----- Cu (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Cr (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)
----- Se (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	nd*	nd*	
Estéril	nd*	nd*	
\bar{X}			CV (%)

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). *não detectado.

Para todos as variáveis analisadas nas raízes de aveia houve efeito isolado de solo e tratamento. Os teores de Ca e K não apresentaram diferença estatística significativa (Tabela 20). O Mg também não respondeu significativamente aos tratamentos, porém observa-se que as raízes das plantas cultivadas no Estéril acumularam mais magnésio, 1,2 mg kg⁻¹, enquanto as cultivadas no “topsoil” 0,7 mg kg⁻¹ (Tabela 20).

As variáveis Ca e Mg não apresentaram diferença estatística significativa tanto para solo quanto para tratamento utilizado nas raízes de azevém (Tabela

20). O K também não diferiu quanto ao tratamento utilizado, mas a média de K nas raízes das plantas cultivadas no Estéril chegou a 8,1 g kg⁻¹ enquanto no “topsoil” foi de 4,1 g kg⁻¹ (Tabela 20).

Tabela 20. Teores de Ca, Mg e K nas raízes de plantas de aveia e azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
Aveia			
----- Ca (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	0,8	1,0	0,9 ^{ns}
Estéril	1,0	1,0	1,0
\bar{X}	0,9 ^{ns}	1,0	CV (%) 33,9
----- Mg (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	0,7	0,7	0,7 b
Estéril	1,3	1,1	1,2 a
\bar{X}	1,0 ^{ns}	0,9	CV (%) 20,7
----- K (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	3,2	3,9	3,5 ^{ns}
Estéril	3,1	3,9	3,5
\bar{X}	3,1 ^{ns}	3,9	CV (%) 35,3
Azevém			
----- Ca (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	0,8	0,8	0,8 ^{ns}
Estéril	0,8	1,2	1,0
\bar{X}	0,8 ^{ns}	1,0	CV (%) 47,0
----- Mg (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	0,7	0,4	0,5 ^{ns}
Estéril	0,7	1,4	1,1
\bar{X}	0,7 ^{ns}	0,9	CV (%) 21,4
----- K (g kg ⁻¹) -----			
Topsoil	4,4	3,9	4,1 b
Estéril	7,9	8,4	8,1 a
\bar{X}	6,1 ^{ns}	6,1	CV (%) 27,1

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Teores em g kg⁻¹.

Nas raízes de aveia, as variáveis Na, Mn, Cu e Fe também apresentaram diferença estatística significativa (Tabela 21). As maiores concentrações de Zn foram encontradas junto ao Estéril, já quando observados os efeitos dos tratamentos, houve decréscimo após a aplicação do material (Tabela 21).

Tabela 21. Teores de Na, Mn, Cu, Zn e Fe nas raízes de plantas de aveia cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Na (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	550,9	465,9	508,4 ^{ns}
Estéril	511,3	535,7	523,5
\bar{X}	531,1 ^{ns}	493,3	CV (%) 27,6
----- Mn (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	448,3	468,0	458,1 ^{ns}
Estéril	822,3	544,7	683,5
\bar{X}	635,3 ^{ns}	506,3	CV (%) 43,9
----- Cu (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	9,9	11,9	10,9 ^{ns}
Estéril	12,3	14,5	13,4
\bar{X}	11,1 ^{ns}	13,2	CV (%) 23,3
----- Zn (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	28,0	19,4	23,7 b
Estéril	42,3	31,0	36,3 a
\bar{X}	35,1 a	25,2 b	CV (%) 14,8
----- Fe (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	5278,0	5284,6	5281,3 a
Estéril	4575,8	3828,6	4202,2 b
\bar{X}	4926,9 ^{ns}	4556,6	CV (%)

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas raízes de azevém, o Na, Cu e Fe não apresentaram diferença significativa (Tabela 22), enquanto houve redução no teor de Mn encontrado nas raízes do T2 (Tabela 22). As variáveis Zn e Fe foram influenciadas duplamente (Tabela 22); o Zn não diferiu quanto aos tratamentos no “topsoil”, mas no Estéril as raízes das plantas cultivadas em T2 apresentaram menor teor de Zn se comparadas a testemunha, na testemunha o teor encontrado foi de 59,9 mg kg⁻¹ enquanto em T2 reduziu para 34,2 mg kg⁻¹.

Tabela 22. Teores de Na, Mn, Cu, Zn e Fe nas raízes de plantas de azevém cultivadas em solos impactados pela mineração de carvão.

Fator	0 SMP	2 SMP	\bar{X}
----- Na (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	396,2	407,1	401,7 ^{ns}
Estéril	505,5	415,8	460,6
\bar{X}	450,8 ^{ns}	411,4	CV (%) 23,9
----- Mn (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	425,2	345,0	385,1 b
Estéril	645,0	405,0	525,0 a
\bar{X}	535,1 a	375,0 b	CV (%) 11,4
----- Cu (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	11,1	11,9	11,5 ^{ns}
Estéril	11,9	16,9	14,4
\bar{X}	11,5 ^{ns}	14,4	CV (%) 32,2
----- Zn (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	22,3 bA	22,6 aA	22,4
Estéril	59,9 aA	34,2 aB	47,0
\bar{X}	41,1	28,4	CV (%) 4,3
----- Fe (mg kg ⁻¹) -----			
Topsoil	5326,0 aA	5416,0 aA	5371,0
Estéril	4270,0 bB	5226,0 aA	4748,0
\bar{X}	4798,0	5321,0	CV (%) 22,2

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

De acordo com Fischer e Fisher (2006) a mineração a céu aberto é a atividade realizada pelos seres humanos que causa as alterações mais bruscas e maior degradação de um habitat natural. Os solos construídos em áreas mineradas são geralmente extremamente compactados devido ao intenso tráfego de máquinas pesadas, a densidade do solo elevada e a restrição do espaço poroso resultam em menor aeração, diminuição da exploração pelas raízes, limitação dos principais nutrientes (SEYBOLT et al., 2004). Em virtude do baixo pH presente nos solos impactados pela mineração de carvão, há concentração de metais como Al, Fe, Mn, Cu e Zn em níveis geralmente tóxicos, além disso as reações que ocorrem nestes solos aceleram as perdas de

nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas, como Ca e Mg, por exemplo, o que acaba influenciando negativamente no processo de revegetação das áreas mineradas (PINTO, KAMPF, 2002; BITTENCOURT, 2015). Deste modo é importante proporcionar um ambiente adequado e equilibrado para o desenvolvimento das culturas nestas áreas, principalmente do sistema radicular, que é o responsável pela busca de nutrientes e água, visando a recuperação das áreas degradadas pela mineração de carvão.

No que diz respeito a incorporação de metais pelas plantas, esta incorporação está diretamente relacionada com a disponibilidade destes elementos no solo (KASHEM et al. 2002), segundo Lambert et al. (2007) a competição gerada entre os metais para a adsorção nos colóides do solo ou absorção pelas plantas depende da proporção de cada um no solo.

5.3.3 Produtividades

Observando os dados de produtividade, para ambos os solos em ambas as culturas, não houve diferença significativa entre os tratamentos utilizados.

A produtividade da aveia alcançou 29,5 g vaso⁻¹ de massa seca no “topsoil” após a aplicação de T2 (2 SMP de FGD-gesso), não diferindo da testemunha que chegou a 27,9 g vaso⁻¹ (Figura 1. A). No estéril, também não houve diferença significativa após a aplicação do T2, sendo que em T2 a produtividade foi de 10,97 g vaso⁻¹, tendo a testemunha alcançado 14,97 g vaso⁻¹ (Figura 1. B)

Já quando comparadas as produtividades médias obtidas em cada um dos solos, observa-se que há diferença estatística (Figura 1. C). No “topsoil” a produtividade chegou a 28,7 g vaso⁻¹, cerca de 55% a mais do que a observada no Estéril.

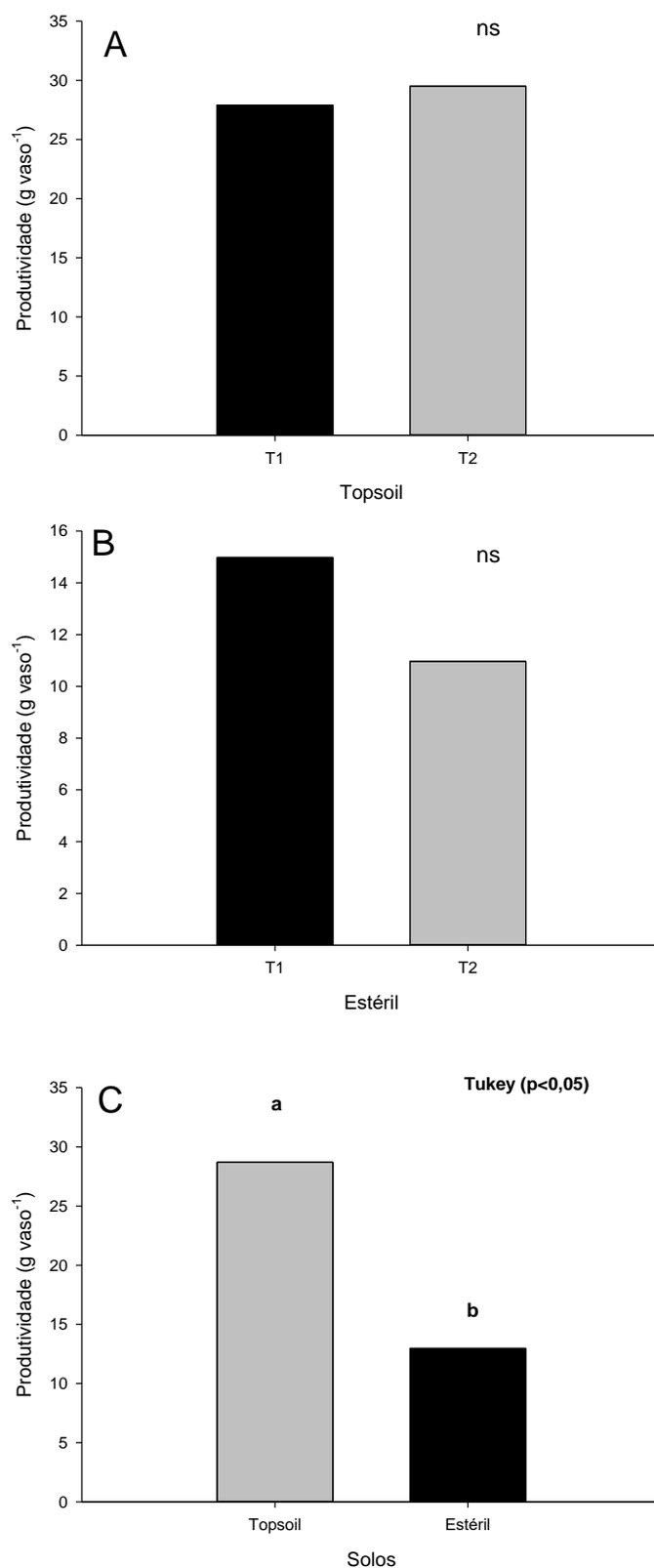


Figura 1. Produtividade aveia – Topsoil (A); produtividade aveia - Estéril (B); produtividade média da aveia em ambos os solos (C). ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Tratamentos: T1 – 0 SMP (Testemunha); T2 – 2 SMP FGD-gesso.

No “topsoil”, a produtividade do azevém alcançou 20,38 g vaso⁻¹ e 20,87 g vaso⁻¹, em T1 e T2, respectivamente, não apresentando diferença estatística entre os tratamentos (Figura 2. A). No estéril, apesar de a produtividade ser mais de 22% maior após a aplicação do FGD-gesso (T2), se comparada a testemunha que alcançou 11,3 g vaso⁻¹, também não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 2. B).

Quando comparadas as médias das produtividades obtidas nos dois solos (Figura 2. C), nota-se que o “topsoil” apresentou produtividade mais elevada, 20,63 g vaso⁻¹, enquanto no Estéril a produtividade foi de 12,95 g vaso⁻¹, cerca de 7,7 g a menos por vaso; reforçando a importância do reestabelecimento de plantas sobre os solos construídos para a recuperação das áreas degradadas pela mineração de carvão a céu aberto.

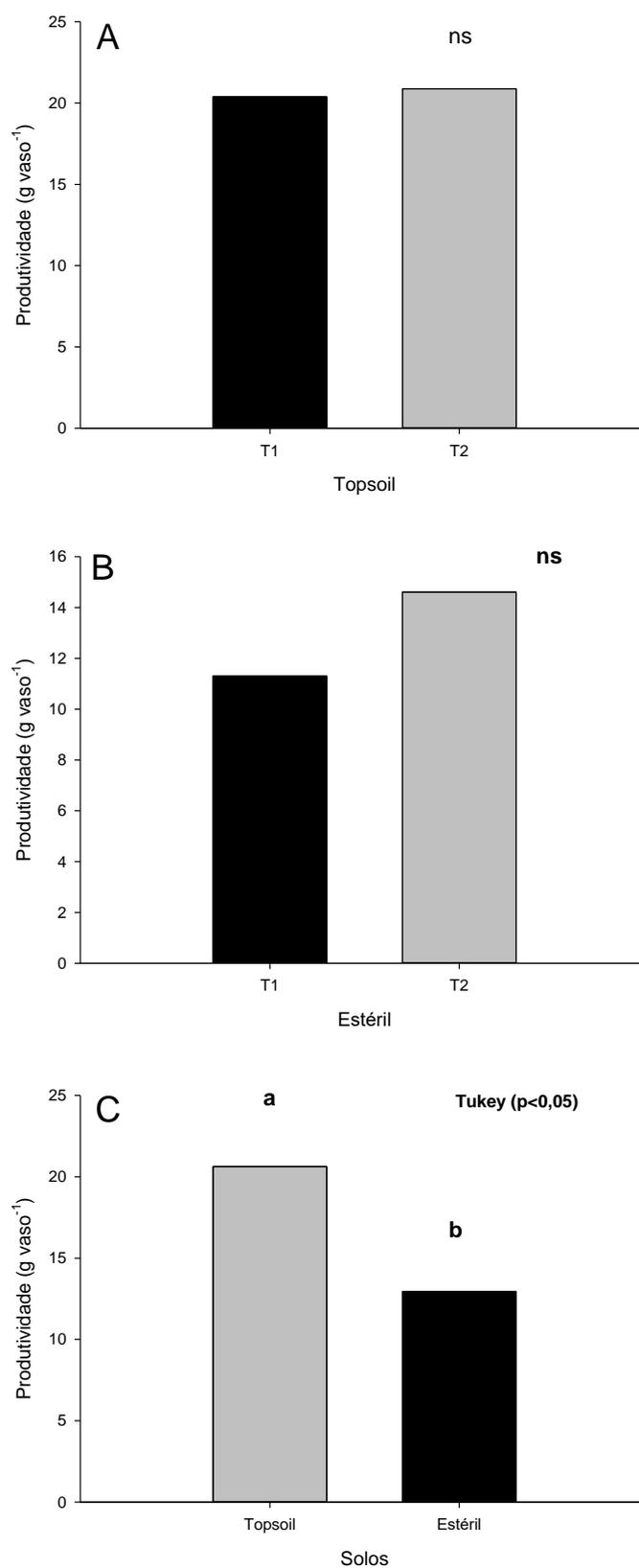


Figura 2. Produtividade azevém – Topsoil (A); produtividade azevém - Estéril (B); produtividade média do azevém em ambos os solos (C). ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Tratamentos: T1 – 0 SMP (Testemunha); T2 – 2 SMP FGD-gesso.

No que se refere a produtividade das culturas não foram observadas diferenças estatísticas pela aplicação do FGD-gesso para ambos os solos. Apesar de não haver diferença estatística, esses incrementos de produtividade corroboram com o encontrado por Chen et al. (2001) após aplicação de FGD-gesso em alfafa, Brown (2018) observou aumento no número e peso de frutos de tomate.

O FGD-gesso apresenta capacidade de reduzir a acidez potencial do solo ($H+Al$) e também de aumentar a disponibilidade de nutrientes, tanto em função do aumento do pH como do aporte realizado através de sua aplicação, especialmente de Ca, além de diminuir a atividade de elementos tóxicos, como o Al, em superfície e subsuperfície (BLUM, CAIRES, ALLEONI, 2013; DESUTTER et al., 2014; ENDALE et al., 2014), propiciando melhorias no ambiente radicular, aumentando seu crescimento, e consequentemente potencializando a absorção de nutrientes pelas plantas, atuando assim na maior produtividade de massa seca pelas culturas.

De qualquer forma, o aumento da produtividade de massa seca é reflexo da maior biomassa de plantas, sendo assim, a maior biomassa por área exercerá maior função na reciclagem de nutrientes, favorecendo o solo e as culturas subsequentes.

Quanto as diferenças de produtividade observadas para as duas culturas em ambos os solos, essas diferenças associam-se também a características intrínsecas aos solos, como por exemplo o teor de óxidos, minerais silicatados, matéria orgânica (COSTA, 2005), e principalmente à elevada acidez e ao desbalanço de nutrientes no estéril que impacta em menor produtividade de matéria seca comparado ao “topsoil”.

5.4 Conclusões

O aporte de FGD-gesso reduz a acidez ativa e potencial do “topsoil”, sob cultivo de ambas as gramíneas, e do Estéril, sob cultivo do azevém, proveniente de área de mineração de carvão a céu aberto.

A aplicação do FGD-gesso proporciona aumento nos teores de Ca, Mg sob cultivo de aveia e azevém para ambos os solos estudados, e nos teores de Zn e Cu em ambos os solos sob cultivo de aveia.

A utilização de FGD-gesso não aumenta a concentração de metais pesados tanto no solo quanto nas plantas cultivadas no “topsoil” e Estéril.

A aplicação de FGD-gesso aumenta a absorção dos nutrientes Ca e Mg pelas plantas de aveia, principalmente Ca, elemento responsável, entre outras funções, pelo desenvolvimento radicular.

Dessa forma, a utilização do FGD-gesso é uma relevante alternativa para a melhoria química de solos impactados pela mineração de carvão a céu aberto no Sul do Brasil, auxiliando no processo de recuperação das áreas degradadas tanto pela melhoria no solo como pelo melhor nível nutricional proporcionado às plantas, que são elementos chave neste processo.

6. Capítulo 2 – Atributos químicos de Planossolo e componentes de rendimento de plantas soja sob aplicação de calcário, gesso agrícola e FGD-gesso.

6.1 Introdução

Resíduos de processos industriais são frequentemente utilizados como fontes alternativas para fertilizantes, corretivos de acidez e condicionadores de solo na agricultura (GOMES et al., 2007; COSTA et al., 2009). No Brasil, a produção de energia predominante é a partir de hidrelétricas, contudo o carvão mineral representa 3,2% da oferta interna de energia elétrica no país (Balanço Energético Nacional, 2019).

Um dos principais potenciais impactos ambientais da combustão do carvão para geração de energia é a liberação de SO_2 (CASTRO, 2016). Este gás reage com o oxigênio e a água presentes no ar atmosférico e gera o composto H_2SO_4 , sendo a sua precipitação conhecida como “chuva ácida” (CASTRO, 2016). Diante disto, durante o licenciamento ambiental das usinas termelétricas são determinados os valores máximos admissíveis de emissão atmosférica de SO_2 (SANTOS, 2006). O SO_2 é retirado da corrente gasosa através do contato com um adsorvente, que, no caso da Usina Termelétrica Presidente Médici, é a cal virgem (CaO), gerando assim um produto seco, o Flue Gas Desulfurization (FGD), denominado FGD-gesso (CGTEE, 2012). Segundo informações da CGTEE, no pleno funcionamento da UTPM chegam a ser produzidas cerca de 900 toneladas deste resíduo por dia, constituindo potencial agravamento de problemas ambientais pelo acúmulo do mesmo, uma vez que a principal forma de disposição de resíduos no país ainda se dá em aterros (ROCHA et al., 2013).

A composição do FGD-gesso é basicamente CaSO_4 , ou seja, assemelha-se muito ao gesso agrícola, porém, materiais oriundos de sistemas onde utilizam-se agentes alcalinizantes para a retirada do SO_2 da corrente gasosa, como no caso da UTPM, geralmente apresentam também potencial de alterar o pH do solo (CARLSON; ADRIANO 1993; DESUTTER et al., 2014) auxiliando na correção da acidez. Além disso, devido ao alto conteúdo de cálcio e enxofre presentes neste resíduo, o mesmo pode ser utilizado para aportar estes elementos ao solo, e dado ao fato de que o CaSO_4 é mais móvel que o

calcário (CaCO_3), este pode alcançar as camadas subsuperficiais do solo aportando Ca e S, ao mesmo tempo em que diminui a atividade do Al e Mn, e também pode promover a solubilidade de outros nutrientes (CLARK et al., 2001; BALIGAR et al., 2011).

De um modo geral, os solos brasileiros são bastante intemperizados e por isso apresentam alto grau de acidez e baixa fertilidade natural (BERNARDI et al., 2002), a acidificação do solo resulta na perda de cátions básicos, como Ca, Mg e K, que são percolados no perfil, dando lugar a elementos como Al nos sítios de troca, devido a sua maior valência (FRANCHINI et al., 2003). Os solos encontrados na metade sul do RS são também caracterizados pela baixa fertilidade natural associada aos problemas de drenagem típicos dos Planossolos, solos predominantes na região. Estes solos são cultivados majoritariamente com arroz irrigado, porém a cultura da soja têm participado do cenário de diversificação nos últimos anos devido ao interesse dos produtores no auxílio ao controle do arroz daninho, na melhoria da qualidade do solo e também no retorno econômico (ANGHINONI; CARLOS, 2018). Segundo a EMATER (2019) houve uma expansão do cultivo desta leguminosa em uma área de cerca de 2 milhões de hectares nesta região, porém os solos presentes são, em sua maioria elevada acidez e de baixa fertilidade natural.

Sendo assim, o objetivo deste estudo foi, além de buscar alternativas de uso para o FGD-gesso, analisar o efeito combinado de calcário e gesso agrícola e do calcário e FGD-gesso nos atributos químicos de um Planossolo, tanto em superfície como em subsuperfície e os impactos nos componentes de rendimento e produtividade da cultura da soja.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Locais

O experimento foi conduzido em dois locais, em condição de campo no ano agrícola 2018/19. Em Arroio Grande – RS (latitude: 32° 14' 19" Sul e longitude: 53° 5' 27" Oeste), junto ao Centro Tecnológico do Chasqueiro (CTC). Em Rio Grande – RS (latitude 32° 02' 06" Sul e a uma longitude 52° 05' 55" Oeste), o experimento foi conduzido na Granja 4 Irmãos. O solo de ambos os locais é classificado como Planossolo Háptico Eutrófico Solódico (STRECK et

al., 2018), e a caracterização química do solo nos dois locais previamente ao estabelecimento do experimento está ilustrada na Tabela 23.

Em Arroio Grande, o experimento foi implantado no dia 8 de novembro de 2018 e a semeadura da cultura da soja (*Glycine max L.*), cultivar DM5958, foi feita em camalhões, 3 dias após a aplicação dos tratamentos. Em Rio Grande, o experimento foi implantado no dia 28 de novembro, com a cultivar BRASMAX Valente RR, semeada no dia seguinte a aplicação, e a adubação foi realizada de acordo com o manejo de adubação adotado pela Granja 4 Irmãos, com 300 kg por hectare de um adubo 2-25-25 mais 80 kg por hectare de cloreto de potássio.

Tabela 23. Parâmetros químicos do solo previamente ao estabelecimento do experimento em Arroio Grande - RS e Rio Grande - RS.

Atributos químicos		Arroio Grande	Interpretação ¹	Rio Grande	Interpretação ¹
pH água		5,4		5,5	
SMP		6,5		6,3	
M.O	%	1,24	Baixo	2,07	Baixo
Argila		29	Classe 3	19	Classe 4
CTC _{pH 7,0}		9,5	Média	10,3	Média
CTC _{efetiva}	cmol _c	7,2		7,3	
H+Al	dm ⁻³	2,5		3,1	
Al		0,2		0,1	
P	mg	13,6	Médio	14,1	Baixo
K	dm ⁻³	84	Médio	78	Médio
S		34,1	Alto	12,7	Alto
Ca	cmol _c	4,1	Alto	4,8	Alto
Mg	dm ⁻³	2,2	Alto	1,9	Alto
Cu	mg	1,0	Alto	0,7	Alto
Mn	dm ⁻³	36	Alto	26	Alto
Zn		0,8	Alto	3,6	Alto
Saturação de Al	%	2,8		1,4	
Saturação de base		73		70	

¹(CQFS-RS/SC, 2016)

6.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Os tratamentos foram constituídos por doses de FGD-gesso com doses combinadas de calcário e gesso agrícola partindo do pressuposto das concentrações de cálcio, sulfitos e do poder de correção da acidez do solo do FGD-gesso (Tabela 24).

Tabela 24. Caracterização química básica do FGD-gesso.

Parâmetros	Resultados
CaO (%)	28,54
MgO (%)	18,71
PN (%)	12,6
PRNT (%)	81,87
S (% m/m)	3,60

Dessa forma, foram definidos os tratamentos de combinações de doses de gesso e calcário e o uso do FGD-gesso, ilustrados na Tabela 25.

Tabela 25. Tratamentos conforme doses de calcário gesso e FGD-gesso em Planossolo sob cultivo de soja em Arroio Grande e Rio Grande.

Tratamentos	Calcário	Gesso agrícola	FDG-gesso
	----- dose -----		
T1	-	-	-
T2	-	-	1 SMP ³
T3	-	1 ²	-
T4	-	2	-
T5	0,5 ¹	-	-
T6	0,5	-	1 SMP
T7	0,5	1	-
T8	0,5	2	-
T9	1	-	-
T10	1	-	1 SMP
T11	1	1	-
T12	1	2	-

¹ SMP (CQFS-RS/SC, 2016).

² 50 vezes o teor de argila (Raj et al., 1996).

³ SMP (CQFS-RS/SC, 2016).

As doses de calcário e FGD-gesso foram calculadas através do índice SMP (CQFS-RS/SC, 2016) e ajustadas para o PRNT 85,53 e 81,87%,

respectivamente. Já as doses de gesso agrícola foram calculadas utilizando 50 vezes o teor de argila presente no solo na camada de 0-20 cm (RAIJ et al., 1996). A recomendação de calcário visando o cultivo de soja, que apresenta pH de referência 6,0, foi de 0,9 ton ha⁻¹ em Arroio Grande e em Rio Grande foi de 1,8 ton ha⁻¹. O teor de argila no solo de Arroio Grande é de 29 % e em Rio Grande de 19%, sendo estes os valores utilizados para calcular a dose de gesso agrícola.

O experimento foi conduzido como parcela subdividida em blocos casualizados constituindo um fatorial, onde: Fator 1 – SMP de calcário, Fator 2 – Fonte de enxofre (gesso agrícola + FGD-gesso), as parcelas apresentavam 48 m² e as subparcelas 12 m². Na parcela foi aplicado calcário e nas subparcelas as doses de gesso e FGD-gesso, sendo estas aplicações superficiais (Figura 3). Em Arroio Grande as doses de gesso agrícola foram de 1,2 t ha⁻¹ (1 dose) e 2,40 t ha⁻¹ (2 doses) por subparcela, as doses de 1 SMP e 0,5 SMP de calcário (PRNT de 85,53%) foram 0,9 t ha⁻¹ e 0,45 t ha⁻¹ respectivamente, em cada parcela, e a dose de FGD-gesso foi equivalente a 0,97 t ha⁻¹ para cada subparcela correspondente. Já junto a Granja 4 Irmãos, as doses de gesso agrícola foram de 0,95 t ha⁻¹ (1 dose) e 1,9 t ha⁻¹ (2 doses), o calcário aplicado foi de 2,1 t ha⁻¹ e 1,05 t ha⁻¹ para 1 SMP e 0,5 SMP, respectivamente, e a dose de FGD-gesso aplicada foi equivalente a 2,2 t ha⁻¹.

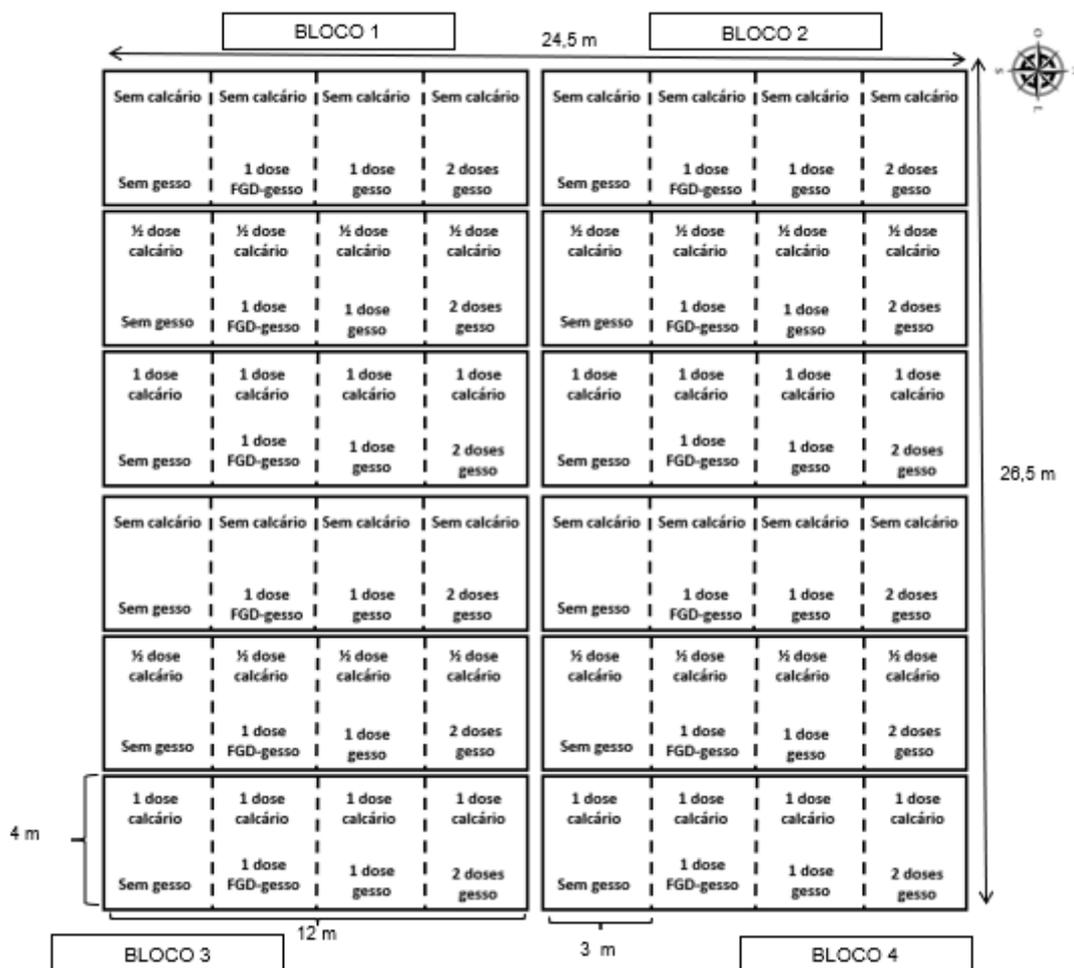


Figura 3. Croqui dos experimentos conforme doses de calcário, gesso agrícola e FGD-gesso em Planossolo sob cultivo de soja em Arroio Grande e Rio Grande - RS.

6.2.3 Determinações

6.2.3.1 Componentes de rendimento da cultura da soja

Os dois experimentos foram conduzidos de novembro a abril e em ambos foi feita a avaliação de estatura de plantas anteriormente a colheita. Na Granja 4 Irmãos o experimento foi colhido no dia 8 de abril de 2019, coletando todas as plantas em uma área de 2,4 m² e no Centro Tecnológico do Chasqueiro foi colhido no dia 17 de abril de 2019, sendo também colhidas todas as plantas em uma área de 4 m².

Após a colheita, foram separadas 4 plantas de cada tratamento onde se fez a contagem direta de vagens por planta e número de grãos por vagem, o restante foi trilhado e teve os grãos úmidos pesados posteriormente. Para determinação da produtividade pesou-se 4 amostras de grãos de cada um dos tratamentos, sendo estas levadas para estufa a 105°C por um período de 24h,

no intuito de padronizar a umidade dos grãos para 13%, e após foi calculada a produtividade dos tratamentos, tanto de Arroio Grande como de Rio Grande, além do peso de 1000 grãos.

6.2.3.2 Atributos de químicos de solo

Os dados relacionados aos atributos químicos foram obtidos através da coleta do solo após o cultivo de soja, cerca de 7 meses após a aplicação dos insumos em seus respectivos tratamentos. Foram coletadas 48 amostras de solo em 3 profundidades (0-10, 10-20 e 20-40 cm) no perfil, totalizando 144 amostras de solo.

No dia 30 de maio de 2019 foram coletadas amostras de solo na Granja 4 Irmãos. A amostragem foi realizada em 6 pontos por subparcela nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, com auxílio de trado de rosca e pá de corte. Posteriormente, as amostras foram levadas ao Laboratório de Química do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel onde foram determinados os teores de macro e micronutrientes (P, K, Na, Ca, Mg, S, Mn), bem como Al, pH em água, pH SMP e condutividade elétrica (C.E.), seguindo metodologia descrita por Tedesco (1995).

No experimento conduzido em Arroio Grande, não foi possível fazer a coleta de solo para avaliação química pois houve a necessidade, por parte dos responsáveis, de desfazer os camalhões presentes na área e preparar o solo, o que impossibilitou a coleta.

6.2.3.3 Análise estatística de dados

Foi avaliado previamente a normalidade dos dados pelo teste de Shapirowilk. Obedecendo os pressupostos de normalidade, os resultados dos componentes de rendimento, bem como das análises químicas do solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as variáveis que apresentaram efeito significativo foram submetidas ao teste de Tukey à 5% de probabilidade de erro, através do software WinStat 1.0.

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Atributos químicos e teores de nutrientes disponíveis após o cultivo da soja

O FGD-gesso é sugerido como substituto ao calcário devido ao seu potencial poder alcalinizante (CARLSON; ADRIANO 1993; DESUTTER et al., 2014), oriundo do CaO utilizado para retirada do S presente na corrente de ar no momento da queima do carvão nas usinas termelétricas; porém o presente estudo não corrobora com essa afirmação, devido ao poder de neutralização do FGD-gesso utilizado ser de apenas 12,6%.

O gesso agrícola não é conhecido como corretivo de acidez, pois quando há reações químicas desse composto no solo não há produção de oxidrilas, porém, a pequena diminuição no pH em água ocasionada pode estar relacionada ao deslocamento dos íons Al^{3+} e H^+ dos coloides do solo, devido ao aumento de íons Ca^{2+} que pode mover os íons ácidos dos sítios da CTC (ZOCCA; PENN 2017). Em alguns estudos observa-se ligeiro aumento do pH em subsuperfície após a aplicação de gesso (CARVALHO e RAIJ., 1997; CAIRES et al., 2004; 2008) e segundo Reeve e Sumner (1972) esse aumento pode estar associado a reação de troca de ligantes com a superfície dos coloides do solo, deslocando OH^- e neutralizando parcialmente a acidez. Diferentemente do esperado, não houve influência do calcário sobre o pH, o que pode se dever ao fato de sua aplicação ter sido superficial.

Na Tabela 26 observam-se as respostas das variáveis pH em água e fósforo (P), variáveis estas influenciadas isoladamente pela camada de solo, dose de calcário e pela adição do gesso agrícola e do FGD-gesso. Em relação ao pH em água, observa-se que o caráter ácido se manteve presente no solo após a aplicação dos tratamentos ($pH < 5,5$). Já o P apresentou distribuição esperada ao longo do perfil, estando o maior teor presente na camada 0-10 cm, porém, esta variável não foi influenciada pela aplicação de calcário superficial ao solo. Analisando a influência das fontes de enxofre sobre os teores de P, nota-se que no Gesso 2 (2 doses de gesso agrícola) obteve-se o maior teor de P disponível, $6,48 \text{ mg dm}^{-3}$, não diferindo estatisticamente de Gesso 1 e do FGD-gesso.

Tabela 26. Valores de pH e teores de P em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Fatores/Níveis	pH	P (mg dm ⁻³)
Camada		
0-10 cm	5,26 a	11,45 a
10-20 cm	5,07 b	4,23 b
20-40 cm	5,37 a	1,63 c
Calcário		
Calcário 0	5,23 ^{ns}	5,67 ^{ns}
Calcário 0,5	5,25	5,82
Calcário 1	5,21	5,82
Fonte de S		
Gesso 0	5,32 a	4,56 b
Gesso 1	5,22 ab	6,1 ab
Gesso 2	5,07 b	6,48 a
FGD-gesso	5,33 a	5,93 ab
CV (%)	5,86	49,0

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas de letras iguais, dentro de cada fator, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O P apresentou o comportamento esperado quando relacionado as camadas do solo, e são observados incrementos nos teores deste elemento conforme o aumento da dose de gesso agrícola e até mesmo do FGD-gesso, o que segundo Fontoura et al. (2019) deve-se principalmente ao fato do gesso conter 1% deste elemento em sua constituição, além disso, possivelmente o aumento dos íons SO₄²⁻ na solução, aportados por ambos os insumos, pode ter contribuído para a dessorção do fósforo dos coloides do solo, aumentando assim sua disponibilidade.

Observando os resultados referentes ao pH SMP (Tabela 27), este foi influenciado por ambos os fatores relacionados aos tratamentos.

Tabela 27. Valor de pH SMP em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Fatores/Níveis	pH SMP		
	Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
Gesso 0	6,17 aB	6,21 abA	6,28 bA
Gesso 1	6,17 aB	6,21 abA	6,32 bA
Gesso 2	6,19 aB	6,23 aB	6,56 aA
FGD-gesso	6,13 aB	6,20 abAB	6,24 bA
CV (%)		1,69	

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando analisados os resultados provenientes de Calcário 0 e 0,5 alternando as doses de enxofre, observa-se que não há diferença significativa entre as médias. Porém, na dose de Calcário 1, observa-se o maior pH SMP

associado ao Gesso 2 (2 doses de gesso agrícola), 6,56, evidenciando sinergia entre o calcário e o gesso.

O pH SMP é o pH relacionado ao poder tampão do solo ou acidez potencial, caracterizado pela soma da acidez trocável com a não trocável, sendo este índice responsável e fundamental para a adequada recomendação de calagem. Na análise dos dados de pH SMP houve sinergismo entre a combinação de gesso agrícola e calcário, diferente do que foi observado por Fontoura et al. (2019). O aumento nesta variável química do solo é atribuído por Caires et al. (2003) ao SO_4^{2-} presente no gesso, que acaba deslocando as oxidrilas (OH^-) dos coloides para a solução, influenciando assim, indiretamente, no pH. O pH SMP inicial deste Planossolo era de 6,30, com a elevação, passando a 6,56, há uma diminuição de 0,7 toneladas na necessidade de calcário por hectare.

O manganês (Mn) (Tabela 28) tem sua disponibilidade afetada diretamente pela acidez do solo, assim como o alumínio (Al). A camada de 0-10 cm apresentou a maior redução no teor de Mn, possivelmente devido a aplicação superficial do calcário, sendo a dosagem de 0,5 a que alcançou o menor teor de Mn, $6,69 \text{ mg dm}^{-3}$. Já a camada de 10-20 cm, apesar de também apresentar redução no teor quando comparado ao inicial, foi a camada que manteve a maior concentração do elemento, não diferindo estatisticamente entre as doses de calcário.

Tabela 28. Teores de Mn em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Fatores/Níveis	Mn (mg dm^{-3})		
	Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
0-10 cm	10,44 bA	6,69 bB	9,06 bAB
10-20 cm	13,37 aA	13,69 aA	14,56 aA
20-40 cm	9,12 bA	11 aA	11 bA
CV (%)		26,12	

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os teores de alumínio trocável foram afetados significativamente pelos tratamentos (Tabela 29), porém de forma isolada. Na camada de 0-10 cm, na dose de Calcário 1, observou-se o menor valor de Al, $0,41 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo 50% menor do que o teor trocável onde não houve aplicação de calcário ($0,81 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), indicando que a calagem superficial afetou a disponibilidade do

elemento na camada inicial do solo, 7 meses após a aplicação, porém a camada de 10-20 cm não foi afetada significativamente por este fator, indicando que a aplicação superficial não pode interferir na acidez desta camada.

Tabela 29. Teores de Al em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Fatores/Níveis	Al (cmol _c dm ⁻³)						
	Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1	Gesso 0	Gesso 1	Gesso 2	FGD-gesso
0-10 cm	0,81aA	0,59bB	0,41bB	0,68aA	0,60aA	0,65aA	0,47bB
10-20 cm	0,76aA	0,72aA	0,69aA	0,78aA	0,64bA	0,73aAB	0,75aAB
20-40 cm	0,58aA	0,44cB	0,5bB	0,52bA	0,55aA	0,49bA	0,46bA
CV (%)	18,93						

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Já quando são analisados os dados que se relacionam as fontes de enxofre e suas dosagens, também demonstrados na Tabela 29, observa-se que na primeira camada o FGD-gesso foi o insumo responsável pela maior redução no teor de Al, alcançando 0,47 cmol_c dm⁻³, evidenciando a capacidade deste insumo atuar sobre a disponibilidade do alumínio.

A disponibilidade de nutrientes é diretamente afetada pelo pH do solo, a faixa de pH ideal, compreendida entre os valores de 5,5 e 6,5, permite maior disponibilidade de elementos como N, S, K, Ca, Mg e P para que sejam absorvidos pelas plantas; ao passo que a faixa de pH ideal disponibiliza nutrientes necessários, também diminui a solubilidade de elementos potencialmente tóxicos como Mn e Al (MALAVOLTA, 1979). No que se refere ao Mn, os teores diminuíram significativamente, mas apenas na camada de 0-10 cm. A aplicação superficial do calcário não alterou o pH de forma significativa, nem mesmo nesta primeira camada, não permitindo que o Mn tivesse sua disponibilidade diminuída em profundidade, todavia, a diminuição do teor na primeira camada associa-se a leve mudança no pH, corroborando com o estudo de Malavolta.

Do mesmo modo, o teor disponível de Al no solo se altera com o aumento do pH. O Al foi influenciado separadamente pelos níveis de calcário e pelas fontes de enxofre. Observando os dados de Al associados as doses de calcário, percebe-se na camada de 0-10 cm o teor de Al³⁺ baixou de 0,81 (Calcário 0)

para $0,41 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Calcário 1 SMP), ou seja, a disponibilidade diminuiu 50%, sendo os efeitos associados a aplicação de calcário na redução de Al^{3+} já bastante estudados (PETRERE, ANGHINONI, 2001; ZAMBROSI et al., 2007; CAIRES et al., 2008). Quando o calcário é aplicado superficialmente, o volume de solo atingido é menor, concentrando assim o efeito inicialmente somente na superfície (MOREIRA et al., 2001), o que prejudica o desenvolvimento radicular das culturas uma vez que o Al^{3+} permanecerá em altas concentrações em subsuperfície (GASCHO, PARKER 2001).

O gesso agrícola tem sido utilizado desde a década de 90 para auxiliar na redução da toxicidade de alumínio em sistemas de plantio direto. O gesso reage com o Al^{3+} e precipita-o, fazendo com que permaneça em formas menos tóxicas, como por exemplo AlSO_4^+ (ZAMBROSI et al., 2007; NEIS et al., 2010; RAMPIM et al., 2013). No presente estudo, houve alterações significativas na camada de 0-10 cm de solo após a aplicação de gesso agrícola e do FGD-gesso. Quando aplicados em superfície estes insumos movimentam-se pelo perfil do solo devido a influência que sofrem pela percolação da água (CAIRES et al., 2004), atuando na redução da toxicidade de Al em subsuperfície (CAIRES et al., 2004; 2011; BLUM, CAIRES, ALLEONI, 2013). Em estudo conduzido por Chen et al. (2009) o uso de FGD-gesso alcançou o mesmo efeito associado ao uso de gesso agrícola, diminuindo os teores trocáveis de Al e Mn, mitigando assim a toxicidade para as culturas.

Observando os resultados obtidos pela interação entre as doses de calcário e as fontes de enxofre sobre os teores de K no solo (Tabela 30), encontra-se a maior média associada a aplicação de 2 doses de gesso agrícola (Gesso 2) sem a aplicação de calcário, chegando a $75,83 \text{ mg dm}^{-3}$. Diferente do que acontece no primeiro caso, nas doses 0,5 e 1 de calcário, o maior teor de K encontra-se associado a 1 dose de gesso agrícola (Gesso 1). O FGD-gesso, mesmo não diferindo estatisticamente das demais fontes de enxofre quando são fixados os níveis de calcário, apresenta valores superiores a testemunha, e também ao Gesso 2 na dose de calcário 0,5 e 1, podendo indicar maior sinergia com o calcário, do que o dobro da dose recomendada de gesso agrícola, para efeitos positivos sobre o teor de K.

Tabela 30. Teores de K em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Fatores/Níveis	K (mg dm ⁻³)		
	Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
0-10 cm	87,94 aA	88,62 aA	89,31 aA
10-20 cm	65,75 bA	52,44 bB	50,00 bB
20-40 cm	51,75 cA	49,12 aB	52,56 bA
Gesso 0	59,00 bA	55,33 aB	60,51 aA
Gesso 1	72,58 abA	79,08 aA	70,67 aA
Gesso 2	75,83 aA	55,83 bB	62,17 aB
FGD-gesso	66,50 abA	63,33 aB	62,50 aA
CV (%)	19,49		

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O aumento do pH do solo não interfere tão significativamente na disponibilidade de potássio (MALAVOLTA, 1979), e corroborando com o observado por Pauletti et al. (2014), o presente estudo não apresentou diferença estatística significativa na disponibilidade de K após a calagem superficial, até mesmo porque não há K na composição do calcário. Rampim et al. (2011) observaram que após a aplicação de gesso houve lixiviação de K⁺, porém isto não foi observado neste estudo, reforçando o encontrado por Pauletti et al (2014). Segundo Zambrosi et al (2008), o motivo de o potássio não lixiviar está associado a baixa formação de K₂SO⁰.

Em relação ao sódio observou-se que este elemento foi afetado de forma isolada pela aplicação de calcário (Tabela 31). Na camada de 0-10 cm, sem diferença significativa, o menor valor de Na foi encontrado na testemunha 19,87 mg dm⁻³.

Tabela 31. Teores de Na em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande – RS.

Fatores/Níveis	Na (mg dm ⁻³)		
	Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
0-10 cm	19,87 bA	28,06 bA	24,68 bA
10-20 cm	18,37 bA	15,75 bA	14,12 bA
20-40 cm	69,12 aA	53,00 aB	51,12 aB
CV (%)	50,28		

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ainda é possível observar que na camada de 20-40 cm do perfil os teores de sódio foram reduzidos nas doses de 0,5 e 1 de calcário (Tabela 31), mesmo tendo a calagem sido feita superficialmente.

No que se refere ao Na, observa-se que há maior concentração do elemento na camada de 20-40 cm, isso está ligado ao fato deste tipo de solo apresentar concentrações elevadas de sódio trocável em subsuperfície (FERREIRA, 2011).

Quando analisados os dados oriundos da interação entre as fontes de enxofre e as camadas do solo sobre os teores de Mg (Tabela 32), observa-se que na camada de 0-10 e 10-20 cm as médias não diferiram estatisticamente entre si. Já na última camada analisada, a de 20-40 cm, os teores de Mg diferiram entre si, tendo sido encontrada a maior média associada ao Gesso 2 (2 doses de gesso agrícola), chegando a $2,65 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, que não diferiu da média $2,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ encontrada após a aplicação de FGD-gesso. O teor inicialmente presente no solo estava enquadrado na classe de disponibilidade alta, tendo este se mantido em praticamente todos os tratamentos após o cultivo da soja.

Tabela 32. Teores de Mg em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande – RS.

Fatores/Níveis	Mg ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)			
	Gesso 0	Gesso 1	Gesso 2	FGD-gesso
0-10 cm	0,98 bA	0,95 bA	0,85 cA	1,1 bA
10-20 cm	1,1 bA	1,21 bA	1,15 bA	1,1 bA
20-40 cm	1,95 aB	2,29 aB	2,65 aA	2,46 aAB
Calcário 0	1,39 aAB	1,38 aAB	1,25 bB	1,57 aA
Calcário 0,5	1,32 aA	1,52 aA	1,52 aA	1,55 aA
Calcário 1	1,28 aB	1,47 aAB	1,67 aA	1,38 aAB
CV (%)	18,69			

Médias seguidas por uma mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando não aplicado o calcário (Calcário 0), o maior teor de Mg foi obtido após a aplicação de FGD-gesso, alcançando $1,57 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Já para a dose 1 de calcário, o maior teor encontrado foi da associação com Gesso 2, chegando a $1,67 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, evidenciando possível sinergia entre a maior dose de calcário e a maior dose de enxofre.

Os teores de Mg aumentaram nas camadas de 10-20 e 20-40 cm após a aplicação do gesso e do FGD-gesso, seguindo o encontrado por Zandoná et al. (2015). A redistribuição vertical pelo perfil do solo dos teores de Mg é benéfica para a nutrição de plantas, mas desde que a camada inicial

permaneça com o teor crítico exigido pela cultura (DALLA NORA et al., 2013). Zambrosi et al. (2007) atribuem esta redistribuição à formação do composto $MgSO_4$, fazendo assim com que o magnésio se movimente no perfil. Além do mais, houve interação positiva entre os níveis de calcário e as fontes de enxofre, evidenciando sinergia entre ambos os fatores, ligando os efeitos de redistribuição de Mg proporcionada pelo gesso com o ligeiro aumento na disponibilidade de Mg ocasionado pelo aumento no pH.

Para o S, nas três camadas e nas 3 doses de calcário, as melhores respostas obtidas das fontes de enxofre sobre o nutriente S estão ligadas as 2 doses de gesso agrícola (Gesso 2), alcançando altos teores também na camada de 20-40 cm, apesar da aplicação superficial do insumo (Tabela 33).

Quando aos teores de Ca no solo, quando analisadas separadamente cada uma das camadas, observou-se pouca variação no comportamento da resposta deste elemento à interação entre os fatores (Tabela 33).

Na camada de 0-10 cm, quando fixados Calcário 0 e 0,5, não houve diferença significativa entre as fontes de enxofre aplicadas. Já na dose de 1 SMP observam-se os maiores teores de cálcio associado ao tratamento Gesso 2, chegando a $3,38 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Na camada de 10-20 cm não houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos aplicados, mas é possível observar que nesta camada a classe de disponibilidade do elemento é média. Já na camada de 20-40 cm, quando fixado calcário 0, o maior teor de cálcio encontra-se junto a dose de FGD-gesso aplicada, correspondendo a $3,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, para Calcário 0,5 e 1, as maiores médias estão associadas ao Gesso 2 apresentando teores de 4,16 e $3,68 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente.

Tabela 33. Teores de S e Ca em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Camada	Enxofre	----- S -----				----- Ca -----	
		Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1	Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
0-10 cm	Gesso 0	4,22 b	3,32 b	2,85 b	2,76 ^{ns}	2,77 ^{ns}	2,7 b
	Gesso 1	8,7 b	7,4 b	7,5 ab	3,13	3,04	2,91 ab
	Gesso 2	16,33 a	12,52 a	12,5 a	3,31	3,24	3,38 a
	FGD-gesso	5,4 b	5,12 b	4,55 b	3,03	3,04	2,98 ab
10-20 cm	Gesso 0	5,63 b	5,2 c	7,9 b	2,49 ^{ns}	2,72 ^{ns}	2,44 ^{ns}
	Gesso 1	15,35 a	11,43 ab	10,87 b	2,85	2,92	2,53
	Gesso 2	15,63 a	16,77 a	18,25 a	3,01	2,62	2,7
	FGD-gesso	10,72 ab	7,67 bc	7,47 b	2,64	2,69	2,42
20-40 cm	Gesso 0	8 c	10,13 c	7,1 c	2,87 b	3,02 b	2,20 c
	Gesso 1	15,47 b	24 b	17,03 b	2,78 b	2,81 b	3,0 b
	Gesso 2	23 a	31,33 a	36,67 a	2,55 b	4,16 a	3,68 a
	FGD-gesso	10,62 bc	12,1 c	9,7 c	3,85 a	3,32 b	2,88 b
	CV (%)		22,89			12,5	

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada fator, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A aplicação de gesso agrícola, além de aportar S, atua na melhoria das condições químicas do solo em subsuperfície através do aumento de Ca^{2+} (CAIRES et al., 2003, 2011; PAULETTI et al., 2014; RAMPIM 2011). No presente estudo verificou-se também, assim como para o magnésio, sinergia entre a aplicação dos dois fatores, na camada de 0-10 cm o maior teor de Ca obtido encontra-se junto a maior dose de cada fator, alcançando $3,38 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, representando um aumento de 18,34% quando comparado a testemunha, esta sinergia no resultado é respaldada por estudo conduzido por Zandoná et al. (2015). A camada de 20-40 cm apresentou incremento nos teores de cálcio, também associados a maior dosagem de cada fator, esse aumento em profundidade se relaciona com a aplicação do elemento, sendo seu movimento vertical no perfil oriundo da ligação com o SO_4 , presente no gesso agrícola, e também com a percolação de água no perfil (COSTA, 2011).

Quanto aos teores de enxofre, houve aumento significativo em todas as camadas do solo associados a todas as doses de enxofre aplicadas, sendo o incremento mais pronunciado relacionado a maior dose de calcário (1 SMP) e a maior dose de gesso (2 doses de gesso agrícola). Chen et al. (2009) avaliaram o solo após 61 dias da aplicação de FGD-gesso e observaram que havia aumento na concentração de S- SO_4 na solução do solo e também em profundidade. Porém, pode-se dizer que este resíduo, no estudo em questão, não respondeu da forma esperada, uma vez que apresentou incrementos menores do que os obtidos com as dosagens de gesso agrícola aplicadas. Do mesmo modo, Caires et al (2004) observaram que a movimentação de S no perfil se deu de acordo com a dose de gesso aplicada. O gesso agrícola melhora a disponibilidade de S para as plantas (COSTA; CRUSCIOL, 2016), Dalla Nora et al. (2017) observaram aumento nos teores de Ca^{2+} e S no solo após 6 meses de aplicação, fundamentando o encontrado no presente estudo, após 7 meses de aplicação. É importante salientar que mesmo a aplicação dos insumos tendo sido feita superficialmente, o incremento de S em profundidade associasse ao fato de o CaSO_4 apresentar alta mobilidade no perfil do solo (CLARK et al., 2001; BALIGAR et al., 2011).

Apesar da não relevância prática da aplicação de fontes de enxofre a este solo devido ao alto teor disponível do elemento inicialmente, o estudo demonstra que esta aplicação mesmo que superficial auxiliou na manutenção

e também proporcionou aumento nos teores do elemento, o que poderá ser importante para os próximos cultivos realizados na área, uma vez que o enxofre é também fundamental para o desenvolvimento das culturas.

Em relação a condutividade elétrica do solo (C.E.) na camada de 0-10cm as doses 0,5 e 1 de calcário não apresentaram diferença significativa nos valores encontrados, mas quando não aplicado calcário (Calcário 0), o maior valor de C.E. está associado ao Gesso 2, chegando a 55,47 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Tabela 34). Houve aumento na C.E. em todas as camadas quando comparadas a testemunha, estando as maiores médias no Gesso 2; na camada de 20-40 cm, o valor da interação entre 1 dose de calcário e Gesso 2 alcançou 90,22 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Tabela 34. Condutividade elétrica em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande - RS.

Fatores/Níveis	Enxofre	----- CE -----		
		Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
0-10 cm	Gesso 0	36,45 b	34,3 ^{ns}	27,9 ^{ns}
	Gesso 1	42,95 ab	52,95	45,2
	Gesso 2	55,47 a	48,0	45,62
	FGD-gesso	39,6 ab	38,25	35,55
10-20 cm	Gesso 0	20,56 b	37,27 c	46,12 b
	Gesso 1	57,22 a	57,5 b	48,6 ab
	Gesso 2	69,67 a	83,65 a	65,35 a
	FGD-gesso	52,72 a	60,12 b	39 b
20-40 cm	Gesso 0	54,8 b	53,62 b	36,75 c
	Gesso 1	65,85 ab	68,72 a	62,75 b
	Gesso 2	83,02 a	70,15 a	90,22 a
	FGD-gesso	69,57 ab	49,07 b	50,75 bc
CV (%)		19,42		

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada fator, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O aumento na condutividade elétrica do solo associado aos dois fatores do presente estudo é reflexo do aumento dos teores de nutrientes como cálcio e sulfato, aportados pelo gesso agrícola e pelo calcário, influenciando nas propriedades químicas do solo em questão (LEE et al., 2007; CHEN et al., 2009). Esse aumento na C.E indica maiores teores de eletrólitos ou sais dissolvidos na solução (Tedesco, 1995), uma vez que o calcário aporta Ca e

Mg, e tanto o gesso agrícola como o FGD-gesso, também aportam nutrientes, como Ca e S, além dos sais presentes nos adubos utilizados nas áreas. As concentrações de hidroxilas presentes no solo, assim como os teores de elementos trocáveis, teores de alumínio, fosfato e sulfato, regulam a C.E (DO CARMO; SILVA, 2016). A C.E pode ser utilizada para estimar o teor de nutrientes (PERALTA; COSTA, 2013), sendo condicionada pela textura, matéria orgânica e também CTC do solo (HEINIGER et al., 2003).

Observam-se mudanças significativas na saturação de bases (V%) associada a interação das doses de calcário e as fontes de S (Tabela 35). Em todas as camadas, o maior valor de V% está associada a maior dose de gesso e a maior dose de calcário, alcançando 66,96%, 66,70% e 75,63% nas camadas 0-10cm, 10-20 cm e 20-40 cm, respectivamente.

Tabela 35. Saturação de bases em um Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso em diferentes profundidades cultivado com soja, Rio Grande-RS relacionadas a camada amostral, dose de calcário, doses de gesso agrícola e FGD-gesso adicionados ao solo.

Camada	Enxofre	----- Sat. Bases -----		
		Calcário 0	Calcário 0,5	Calcário 1
0-10 cm	Gesso 0	54,19 ^{ns}	53,99 ^{ns}	56,46 b
	Gesso 1	55,79	56,76	58,58 b
	Gesso 2	57,12	56,25	66,96 a
	FGD-gesso	56,48	57,77	59,59 b
10-20 cm	Gesso 0	58,81 ab	61,25 ^{ns}	57,35 c
	Gesso 1	62,59 a	61,4	62,88 ab
	Gesso 2	61,46 ab	61,4	66,70 a
	FGD-gesso	56,23 b	59,44	58,30 bc
20-40 cm	Gesso 0	62,15 ab	63,71 b	62,85 bc
	Gesso 1	60,59 b	65,78 b	67,24 b
	Gesso 2	62,46 ab	73,29 a	75,63 a
	FGD-gesso	67,74 a	67,25 b	60,99 c
CV (%)		4,78		

^{ns}Não significativo pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade de erro.

Médias seguidas por uma mesma letra minúscula na coluna, dentro de cada fator, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A saturação por bases expressa a parte da CTC ocupada por Ca, Mg e K (Raij., 2011), a partir dos dados obtidos no presente estudo é possível observar que os maiores teores dos elementos Ca, Mg e K encontram-se associados a mesma interação que resultou na maior saturação por bases, 1 dose de calcário e 2 doses de gesso agrícola, corroborando com Pulz et al. (2008) que observaram que a adição de corretivos de acidez ao solo elevaram a saturação por bases.

6.3.2 Produtividade da soja e componentes de rendimento

São 4 os componentes principais de rendimento responsáveis pela produtividade: número de plantas por área, número de vagens por planta, número de grãos por vagem e o peso de 1000 grãos.

Os componentes de rendimento da soja são afetados tanto pela fertilidade do solo quanto por fatores que fogem ao controle do produtor, como por exemplo, temperatura e umidade. Segundo Verneti e Verneti Junior (2009), a estatura de plantas, por exemplo, é uma característica geneticamente controlada, mas as variações climáticas ambientais podem afetar sua expressão gênica.

Em Arroio Grande, não se observou diferença significativa entre a estatura, número de vagens e número de grãos por vagem. (Figura 4). Quanto a estatura de plantas (Figura 4A) não houve diferença significativa entre os tratamentos, apresentando uma média geral de 57,8 cm de altura. O número de vagens e o número de grãos por vagem (Figura 4B e 4C) também não apresentaram diferença significativa, com médias de 66,52 e 2,05 respectivamente.

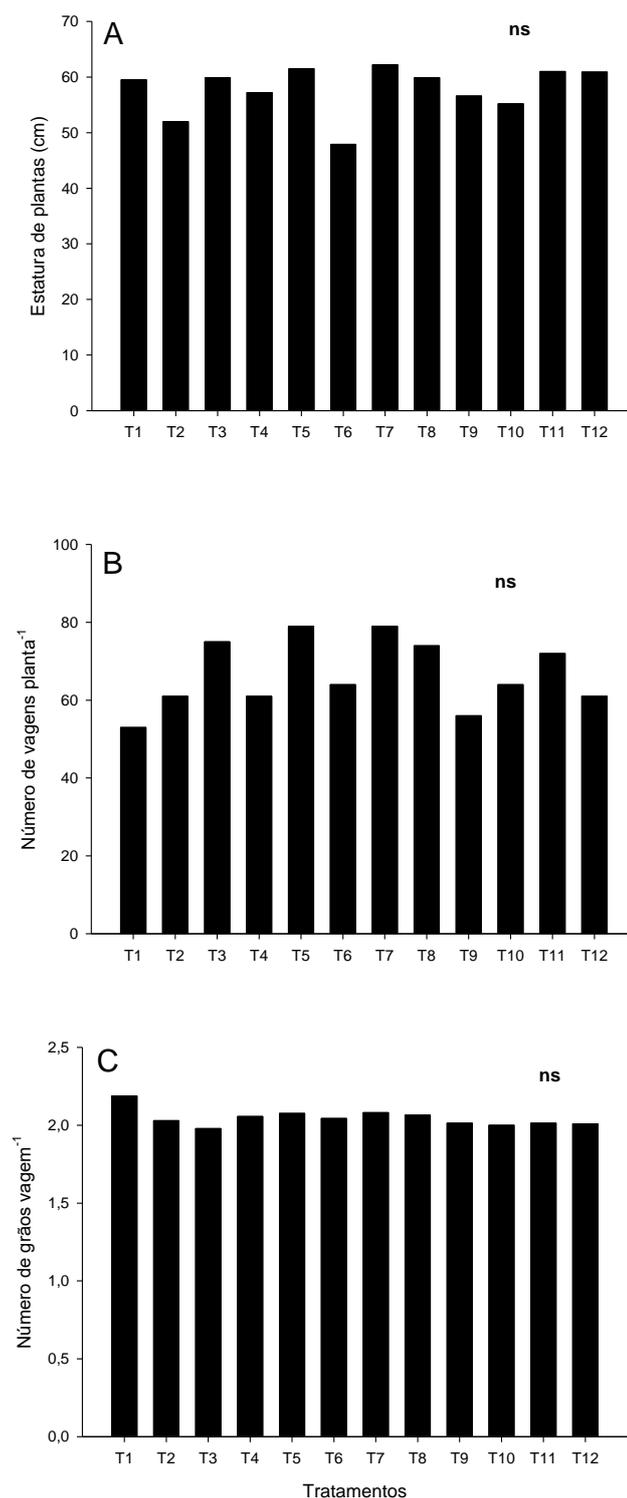


Figura 4. Estatura (A); número de vagens por planta (B) e número de grãos por vagem (C) em soja cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Arroio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: sem calcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O peso de 1000 grãos, componente este que representa o tamanho do grão, também não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos utilizados no experimento (Figura 5A), apresentando uma média geral de 124 g. Já quando são observadas as produtividades (Figura 5B), mesmo não havendo diferença estatística significativa entre os tratamentos, o maior volume produzido foi de 2330 kg ha⁻¹ no tratamento 8 (0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso agrícola), representando 38,8 sacos por hectare.

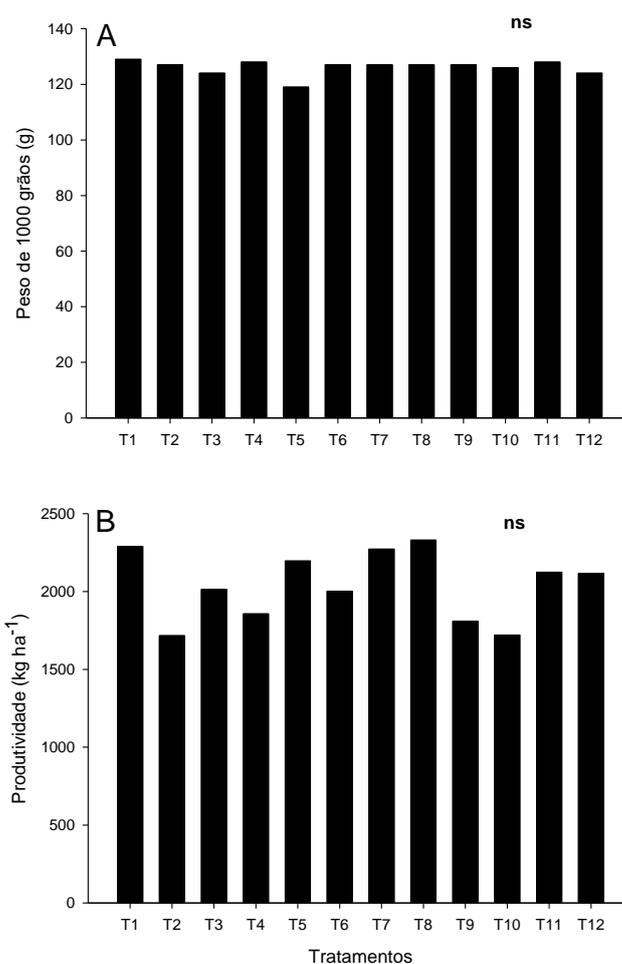


Figura 5. Figura 5. Peso de 1000 grãos (A) e produtividade de soja (B) cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Arroio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: sem calcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quando observados os resultados obtidos em Rio Grande - RS, também verificou-se que não houve diferença significativa entre o número de vagens por planta e o número de grãos por vagem, mas houve diferença relacionada a estatura de plantas (Figura 6).

A maior estatura foi observada junto ao T10 (1 SMP de calcário + FGD-gesso), 87 cm, não diferindo de T5 (0,5 SMP de calcário sem gesso), com 85,8 cm, mas diferindo das demais; a média geral da estatura de plantas foi de 79,3 cm (Figura 6A); a média de número de vagens por planta (Figura 6B) e número de grãos por vagem (Figura 6C) foi de 37 e 2,05, respectivamente.

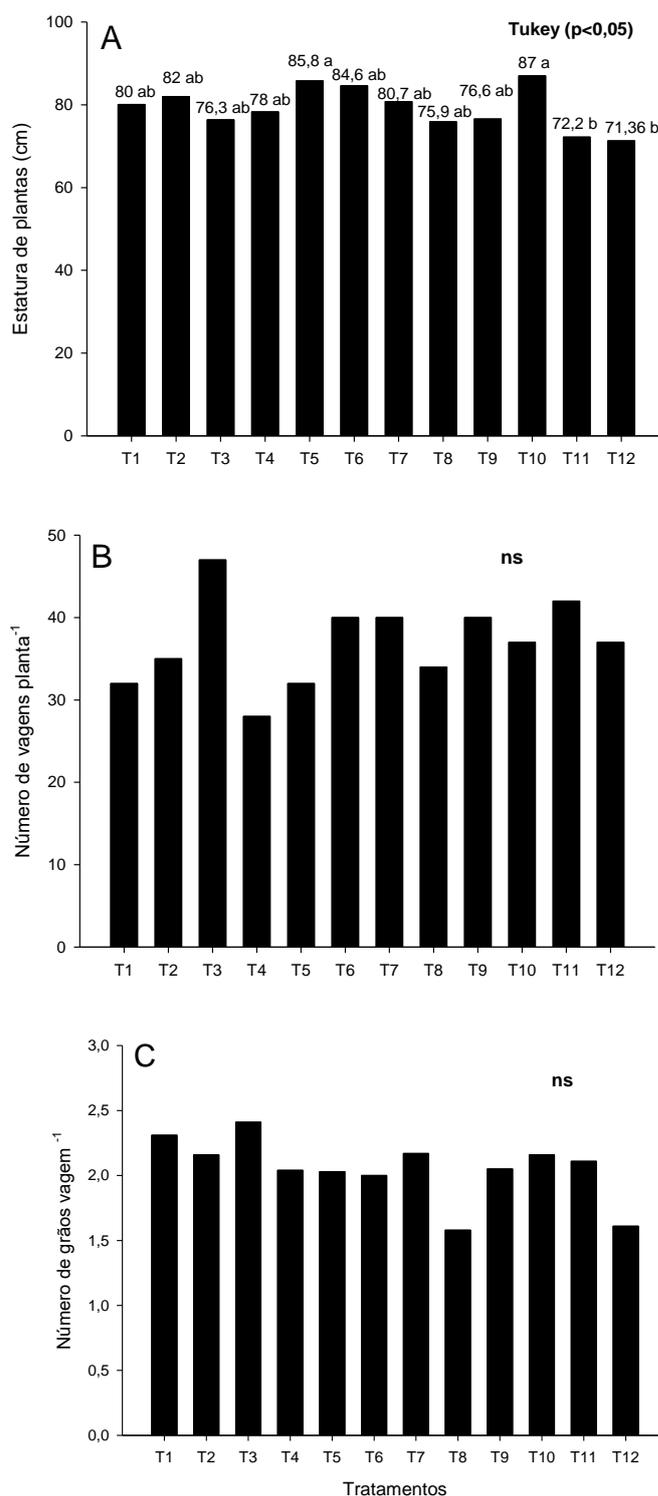


Figura 6. Estatura (A); número de vagens por planta (B) e número de grãos por vagem (C) cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Rio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: sem calcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O peso de 1000 grãos e a produtividade (Figura 7A e 7B) obtidas em Rio Grande, também não apresentaram diferença estatística. O peso de 1000 grãos (Figura 5A) teve como média geral de todos os tratamentos 129,75 g.

Quando observado o gráfico de produtividade (Figura 7B) percebe-se que houve oscilações entre as produtividades, porém estas não diferiram estatisticamente. O tratamento 10 (1 SMP de calcário + 1 SMP de FGD-gesso) foi o que apresentou maior volume produzido, chegando a 5231 kg ha⁻¹, cerca de 87 sacos de soja por hectare, seguido pelo tratamento 12 (1 SMP de calcário + 2 doses de gesso agrícola) que obteve produtividade de 4842 kg ha⁻¹.

Diante dos tratamentos que apresentaram as maiores médias, observa-se que em ambos há associação da maior dosagem de calcário a uma fonte de enxofre. Apesar de não haver significância entre as diferentes médias de produtividade, é possível perceber que há um incremento de 22 sacos de soja em T10 quando comparado a T6 (0,5 SMP de calcário + 1 SMP de FGD-gesso), que teve a menor média, 3890 kg ha⁻¹.

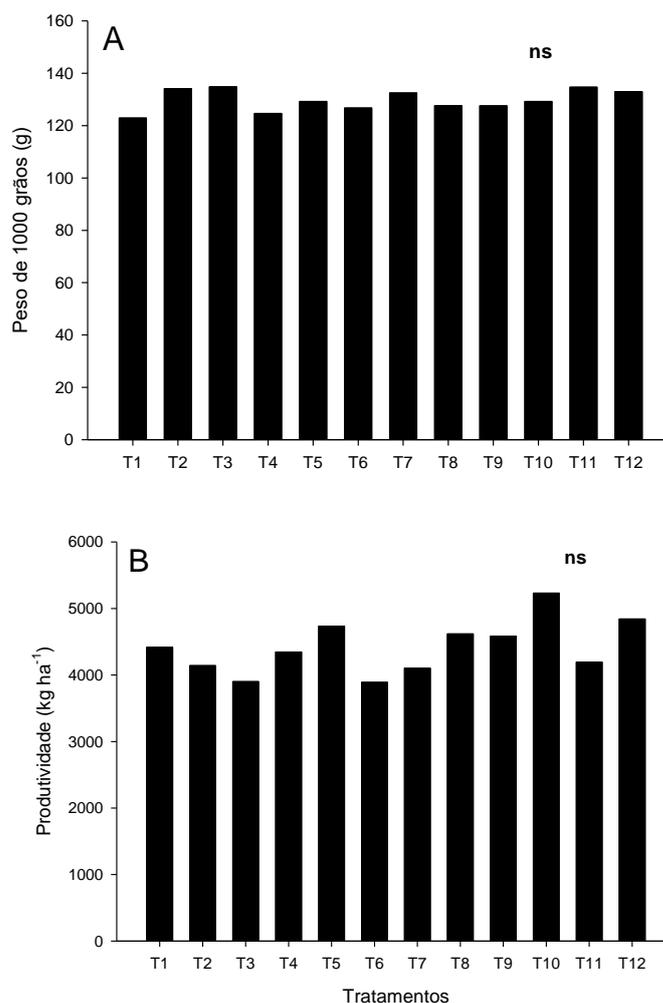


Figura 7. Peso de 1000 grãos (A) e produtividade a soja (B) cultivada em Planossolo sob aplicação de calcário, gesso e FGD-gesso, Rio Grande - RS. Tratamentos - T1: sem calcário sem gesso; T2: sem calcário sem gesso + FGD-gesso; T3: sem calcário + 1 dose de gesso; T4: sem calcário + 2 doses de gesso; T5: 0,5 SMP de calcário sem gesso; T6: 0,5 SMP de calcário + FGD-gesso; T7: 0,5 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T8: 0,5 SMP de calcário + 2 doses de gesso; T9: 1 SMP de calcário sem gesso; T10: 1 SMP de calcário + FGD-gesso; T11: 1 SMP de calcário + 1 dose de gesso; T12: 1 SMP de calcário + 2 doses de gesso. ns: médias não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Neste estudo, exceto a estatura em Rio Grande, todos os componentes de rendimento da cultura da soja não apresentaram diferença estatística significativa entre os tratamentos. Corroborando com o observado por Thomas e Costa (2010), o número de grãos por vagem não apresentou diferença, devido a ser o componente que apresenta menor variação dentre os demais, mantendo uma média de 2 grãos por vagem.

No que se refere a produtividade, em ambos os locais, as médias dos tratamentos também não diferiram entre si ($p > 0,05$). Em Arroio Grande a maior produtividade chegou a 2330kg ha⁻¹

Já em Rio Grande, as maiores produtividades, mesmo sem haver diferença estatística das demais, alcançaram 5232 (T10) e 4842 kg ha⁻¹(T12), respectivamente, em ambos os tratamentos houve o aporte de uma fonte de enxofre. Mesmo a testemunha não tendo sido a que apresentou a menor média, mas para fins de comparação, houve um aumento de 15,55% para o tratamento 10, onde aplicou-se 1 SMP de calcário e 1 SMP de FGD e de 8,76% para o tratamento 12, onde fez-se aplicação de 1 SMP de calcário mais 2 doses de gesso agrícola, representando, 13 e 7 sacos a mais por hectare, respectivamente, se comparados a testemunha (T1).

Marchesan et al. (2017) conduziram experimento semelhante em um Planossolo e não observaram respostas em produtividade de soja após a aplicação de gesso agrícola. Todavia, Caires et al. (2011) obtiveram resultados positivos com a aplicação de gesso em superfície, aumentando o rendimento de grãos e promovendo retorno econômico.

O número de estudos que demonstram aumento de produtividade das culturas após a aplicação de gesso vem crescendo ao longo dos anos (RAIJ, 1988; CARVALHO e RAIJ., 1997; CAIRES et al., 2011; DALLA NORA e AMADO, 2013 ; MICHALOVICZ et al., 2014; PAULETTI et al., 2014; ZANDONÁ et al., 2015; SOMAVILLA et al., 2016), inclusive para a cultura do arroz de sequeiro (OLIVEIRA et al., 2009; SORATTO et al., 2010).

Em estudo realizado por Zandoná et al. (2015) em Latossolo, onde houve aplicação tanto de gesso quanto de calcário, avaliando milho e soja, estes obtiveram até 11,4% de incremento de produtividade na soja no tratamento com até 2 t ha⁻¹ de gesso agrícola associado ao calcário, ambos aplicados em superfície. Este resultado evidencia a possibilidade de sinergismo nos efeitos da associação destes insumos, apontando ganhos em produtividade e melhoria de propriedades químicas do solo.

Observando a matriz de correlação linear (Tabela 34), o Na, Ca, Mg e o pH apresentaram correlação positiva com a produtividade; a maior correlação positiva com a produtividade está atrelada ao Mg (0,61528). O Al por sua vez, apresentou correlação negativa (-0,11308), porém o Mn apresenta correlação positiva.

Tabela 36. Matriz de correlação linear entre os atributos químicos do solo e a produtividade de soja em Planossolo após a aplicação de calcário, gesso agrícola e FGD-gesso, em Rio Grande – RS.

Atributos	Coeficientes de correlação											
	K	Na	P	Ca	Mg	Mn	Al	pH	pH_SMP	C.E.	S	Produtividade
K		0,43016	0,5803	0,92708	0,57283	0,56699	0,84229	0,62668	0,11584	0,67585	0,84472	0,86355
Na	0,25162		0,33177	0,089438	0,69148	0,50353	0,90239	0,42008	0,71093	0,77464	0,61491	0,77314
P	0,17783	-0,30698		0,52106	0,73311	0,7228	0,28353	0,20028	0,80695	0,83279	0,74588	0,57905
Ca	0,029665	0,51114	0,2058		0,18959	0,33378	0,006278	0,89608	0,91982	0,5935	0,93637	0,8974
Mg	-0,18129	0,12813	0,11021	0,40664		0,050143	0,55256	0,22876	0,98066	0,94227	0,049555	0,033207
Mn	0,18401	-0,21434	0,11462	-0,30577	-0,57569		0,63364	0,00714	0,6369	0,76688	0,53624	0,83035
Al	-0,06444	0,039749	0,33737	0,7367	0,19078	-0,1536		0,9345	0,33014	0,42403	0,98597	0,72641
pH	-0,15672	-0,25697	0,39784	-0,04233	-0,37571	0,72907	-0,02664		0,13312	0,69929	0,23181	0,97035
pH_SMP	-0,47819	-0,11972	0,079104	-0,03263	-0,00786	0,15215	-0,30797	0,45925		0,041553	0,5873	0,86876
C.E.	-0,13494	0,092626	-0,06837	0,17176	-0,02348	0,095894	-0,25487	0,12474	0,59433		0,61065	0,61615
S	0,063437	-0,16202	-0,10478	0,025879	-0,57689	0,19852	-0,0057	0,37344	0,17461	0,16395		0,35569
Produtividade	-0,05568	0,093256	-0,17841	0,041787	0,61528	0,069383	-0,11308	0,012049	-0,053535	-0,16146	-0,29281	

A matriz de correlação foi montada com o objetivo de analisar as correlações lineares simples, de forma pareada, entre os atributos químicos do solo e a produtividade. Corroborando com Rachid Junior et al. (2006), os teores de cálcio e magnésio trocáveis, assim como o pH, apresentaram correlação positiva com a produtividade, indicando que à medida que há aumento nos teores destes nutrientes no solo e do pH ocorrerá aumento na produtividade da soja.

6.4 Conclusões

A aplicação conjunta de gesso agrícola e calcário apresentou sinergia sobre as variáveis pH SMP, K, S, Ca, C.E e V% do solo, refletindo assim em benefícios sobre estes atributos de solo.

O FGD-gesso não atuou sobre o pH em água, como já era esperado, porém aumenta o teor de P disponível, diminuí o Al tóxico em superfície, incrementa Ca e S no perfil do solo e aumenta os teores de Mg em profundidade.

O gesso agrícola apresenta potencial de utilização nas áreas de várzea, incrementando o teor de P disponível, diminuindo o teor de Al tóxico em subsuperfície, proporcionando redistribuição vertical dos teores de Mg, incrementando os teores de Ca e S no perfil do solo.

Dessa forma, o gesso agrícola e FGD-gesso são alternativas para a melhoria dos atributos químicos de solos de terras baixas do Sul do Brasil, tradicionalmente cultivados com arroz irrigado, para o cultivo de soja, cultura esta mais exigente em disponibilidade de nutrientes no solo e menor acidez. Porém faz-se necessário estudar o comportamento e as interações que ocorrem no solo após o cultivo de arroz, visto que o sistema de cultivo é irrigado.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração de carvão a céu aberto consiste na principal forma de extração deste mineral no estado do Rio Grande do Sul. Esta forma de extração, causa desordens físicas, químicas e biológicas no solo, além de interferir diretamente na paisagem do local.

O processo de reconstrução paisagística da mina gera os solos construídos. Estes solos apresentam alto grau de compactação, devido ao intenso tráfego de máquinas pesadas durante o processo, além de também apresentarem elevada acidez, oriunda da oxidação de sulfetos de ferro, principalmente a pirita, dando origem a drenagem ácida das minas. Após a reconstrução, estes solos exibem pH em torno de 3,5, o que prejudica a revegetação das áreas, prevista em lei.

Para além da mineração propriamente dita, a queima do carvão mineral nas usinas termelétricas também apresenta potenciais impactos ao meio ambiente. Durante a queima são gerados os resíduos sólidos conhecidos como produtos da combustão do carvão, além do resíduo sólido, FGD-gesso, oriundo do processo de dessulfuração dos gases exaustos. A produção de FGD-gesso alcança, em pleno funcionamento da UTPM – Candiota/RS, 900 toneladas diárias, sendo necessária a alocação do resíduo em locais como aterros e até mesmo nas cavas de mineração.

Tendo em vista que o FGD-gesso apresenta potencial de alterar o pH do solo, devido a presença de agentes alcalinizantes utilizados durante o processo de retirada do enxofre da corrente gasosa, e também que este material já vem sendo disposto na Mina da Candiota, o estudo dos efeitos oriundos desta disposição merecem atenção. Mediante aplicação do FGD-gesso em solos impactados pela mineração de carvão, foi possível constatar que há melhoria tanto na acidez ativa como potencial do solo, bem como aumento da disponibilidade de nutrientes, melhorando a fertilidade dos solos e proporcionando melhores condições para o desenvolvimento da vegetação. Além disso, a aplicação de FGD-gesso auxiliou na maior absorção de nutrientes pelas plantas cultivadas, principalmente cálcio, sem que houvesse acúmulo de elementos traço, tanto no solo, quanto nas plantas.

Este resultado é importante uma vez que demonstra os efeitos associados a aplicação do FGD-gesso nos solos da mina, tendo potencial de auxiliar na revegetação das áreas após a mineração, sendo benéfico tanto para o solo, quanto para as plantas.

Levando em consideração que os solos agrícolas presentes na metade sul do RS apresentam normalmente baixa fertilidade natural e baixo pH, e tendo em vista também a necessidade de aporte de enxofre a maioria destes solos, e ainda o volume de FGD-gesso produzido, buscou-se estudar a possibilidade de uso deste resíduo junto a culturas agrônômicas. Resultados positivos foram observados sobre o aumento do teor de nutrientes disponíveis no solo, incremento de Ca e S, bem como a diminuição do Al tóxico em superfície e subsuperfície.

Os resultados obtidos refletem os impactos positivos associados a utilização deste passivo ambiental tanto em áreas mineradas quanto em áreas agrícolas, contribuindo não somente com a fertilidade destes solos e proporcionando melhor desenvolvimento das culturas, mas também servindo de alternativa para utilização de FGD-gesso, contribuindo ambientalmente através da redução do acúmulo do mesmo e disposição de forma incorreta.

Porém, é importante que sejam feitos estudos subsequentes para que se observem os efeitos associados a aplicação do FGD-gesso ao longo do tempo. A partir de pesquisas podem ser exploradas maiores possibilidades de uso, com intuito de reforçar os resultados obtidos, seja em relação ao aporte de nutrientes ao solo ou aos efeitos sobre as plantas e produtividade, bem como investigar as possíveis interações tanto com a física quanto com a biologia do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCM. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL. **História do carvão no Brasil**. Disponível em:

http://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=8&i_area=4.

Acesso em: 15 fev 2020.

ALBERT, R. P. **Potencial de acidificação e de neutralização em materiais geológicos da jazida de carvão de Candiota, sul do Brasil**. 2018. 72f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. **Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo**. R. Bras. Ci. Solo, v.32, p.2505-2516, 2008.

AMARAL, C. S., B. SILVA E., G. AMARAL W., E O. NARDIS B. **Crescimento de *Brachiaria brizantha* pela adubação mineral e orgânica em rejeito estéril da mineração de quartzito**. Biosci. J. 28: 130-141. 2012.

ANEEL- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. edição – Brasília : Aneel, 2008. 236p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em 03 fev 2020.

ANGHINONI, I.; CARLOS, F.S. O cenário para diversificação. In: CARMONA, F.C.; DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.M.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F. **Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas: a integração lavoura-pecuária como o caminho da intensificação sustentável da lavoura arroseira**. Porto Alegre: edição dos autores, 2018. 160 p.

ASSMANN, J. M.; BRAIDA, J. AI.; CASSOI, L. C.; MAGIERO, E. C.; MANTELI, C.; GRIZ, E. Produção de matéria seca de forragem e acúmulo de nutrientes em pastagem anual de inverno tratada com esterco líquido de suínos. **Ciência Rural**. 2009. vol. 39, núm. 8, novembro, pp. 2408-2416 Universidade Federal de Santa Maria.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acesso em 16 fev 2020.

BALIGAR, V. C., CLARK, R. B., KORCAK, R. F., & WRIGHT, R. J. Flue gas desulfurization product use on agricultural land. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 2011. p. 51-86.

BARAUD, F. L. L. Influence de fertilisants NPK sur la spéciation minéralogique et la biodisponibilité des métaux dans les sols. **12ème Colloque National de la Recherche en IUT**. 2006.

BENNETT, J. M., GREENE, R. S. B., MURPHY, B. W., HOCKING, P., & TONGWAY, D. **Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of a Red Sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales**. Soil Research, v. 52, n. 2, p. 120-128, 2014.

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A., SILVA, C. A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C. M.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2002. p. 61-77.

BISSANI, C., TEDESCO, M. J., GIANELLO, C., & CAMARGO, F. A. O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 344p.

BITENCOURT, D. G. B., PINTO, L. F. S., PAULETTO, E. A., SILVA, M. T., & GARCIA, G. F. Geração de drenagem ácida e de contaminação por metais pesados em perfis de solos construídos em área de mineração de carvão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1821-1834, 2015.

BLUM, C. S.; CAIRES, E.F.; ALLEONI, L.R.F. Lime and phosphor gypsum application and sulfate retention in subtropical soils no-till system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 279-300, 2013.

BORBA, R. F. - **Balanco Mineral Brasileiro**, 2001. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-carvao-mineral/@@download/file/BALANCO_MINERAL_006_2001.pdf> . Acesso em 03 fev 2020.

BORKERT, C. M., GAUDÊNCIO, C. D. A., PEREIRA, J. E., PEREIRA, L. R., & OLIVEIRA JUNIOR, A. D. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 1, p. 143-153, 2003.

BORTOT, A. ZIM-ALEXANDRE. Programa de proteção e melhoria da qualidade ambiental da bacia do rio Tubarão e complexo lagunar. **Rev. Tecnol. Ambiente**, Criciúma, v. 1, n. 1, p. 55-74, 1995.

BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. Acesso em 15 fev 2020.

BRASIL 1986 – CONAMA 001/86. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8902>. Acesso em 21 jan 2020.

BRASIL 2019 - Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Estadual - Rio Grande do Sul / Coord. Técnica de José Eduardo da Costa Duarte et al.; Equipe Técnica por José Eduardo da Costa Duarte – Brasília: ANM, 2019. 55 p.: il. Ano

base 2017. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-estadual/rio-grande-do-sul/anuario-mineral-estadual-rio-grande-do-sul-2018-ano-base-2017>. Acesso em 20 mar 2020.

BRAUER, D., G.E. AIKEN, D.H. POTE, S.J. LIVINGSTON, L.D. NORTON, T.R. WAY, AND J.H. EDWARDS. **Amendment effects on soil testphosphorus**. J. Environ: Qual.,2005. p34:1682-1686.

BRIGGS, C.W. R. FINE, M. Markee, and M.S. Gustin. **Investigation of the potential for mercury release from fluegas desulfurization solids applied asna agricultural amendment**. J. Environ. Qual 2014. 43:253–262 (thisissue). doi:10.2134/jeq2012.0049.

BROWN, Brian. **Horticultural uses for flue gas desulfurization gypsum**. 2018.

BUGIN, A. Introdução à recuperação de áreas degradadas. In: BUGIN, A. **Meio ambiente e carvão**: impactos da exploração e utilização. Porto Alegre: FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/FEPAM, 2002. p.93-98.

BURGESS-CONFORTI, J. R., MILLER, D. M., BRYE, K. R., & POLLOCK, E. D. **Plant uptake of major and trace elements from soils amended with a high-calcium dry flue gas desulfurization by-product**. Fuel, v. 208, p. 514-521, 2017.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. Use of gypsum for cropgra in production under a subtropical no-tillcropping system. **AgronomyJournal**, 103(6), 1804-1814. 2011.

CAIRES, E.F., PEREIRA FILHO, P.R.S., ZARDO FILHO, R., FELDHAUS, I.C. **Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface limingand covero at residues under a no-till system**. Soil Use Managemant. V. 24, p. 302–320, 2008.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. &KUSMAN, M.T. **Alterações químicas do solo e respostada soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto**. R. Bras. Ci. Solo, 27:275-286, 2003.

CAIRES, E.F.; FELDHAUS, I.C. e BLUM, J. **Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso**. Bragantia: 2001. vol.60, n.3, p.213-223. 2001.

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; BARTH, G. & CORRÊA, J.C.L. **Effects of soil acidity amelioration by surface limingon no-tillcorn, soybean, and wheat root growth and yield**. Eur. J. Agron., 28:57-64, 2008.

CAIRES, E.F.; KUSMAN, M.T.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. PADILHA, J.M. **Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso**. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2004. vol.28, n. 1, p.125-136. 2004.

CARLSON, Claire L.; ADRIANO, Domy C. **Environmental impacts of coal combustion residues**. Journal of Environmental quality, v. 22, n. 2, p. 227-247, 1993.

CARVALHO, A. J. E. **Uso de composto de resíduos da indústria têxtil na cultura da alface**. Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina: MG, 2012.

CARVALHO, M. C. S.; VAN RAIJ, B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997.

CASTRO, R. P. V. **Caracterização de sólidos e desenvolvimento de metodologia analítica para monitoramento de tratamento oxidativo de resíduos sólidos de dessulfurização de fases exaustos de termelétrica a carvão**. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químico e Bioquímicos) Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM. **Carvão Brasileiro: tecnologia e meio ambiente**/Eds. Paulo Sergio Moreira Soares, Maria Dionísia Costa dos Santos, Mario Valente Possa. CDD – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 300p. il.

CGTEE – Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica, 2018. Disponível em: < <http://cgtee.gov.br/USINA-CANDIOTA/>> Acesso em: 29 de julho de 2019.

CGTEE – Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica, Eficiência Energética e Cuidados Ambientais em Empreendimentos a carvão – a experiência da UTE CANDIOTA III – 350 MW (Fase C da Usina de Candiota). Apresentação 2º Thermal Energy Latam, Rio de Janeiro, 1 de fevereiro de 2012. Disponível em: < http://www.carvaomineral.com.br/arquivos/Hermes_Ceratti.pdf > Acesso em: 29 de julho de 2019.

CHEN, L., D. KOST, Y. TIAN, X. GUO. D. Watts, D, NORTON, R.P. Wolkowski, and W.A. Dick. **Effects of gypsum on trace metals in soils and earth worms**. J. Environ. Qual. 2014.43:263–272 (this issue).

CHEN, L., RAMSIER, C., BIGHAM, J., SLATER, B., KOST, D., LEE, Y. B., & DICK, W. A. **Oxidation of FGD-CaSO₃ and effect on soil chemical properties when applied to the soil surface**. Fuel, v. 88, n. 7, p. 1167-1172, 2009.

CHEN, L.; TIAN, Y.; STEHOUWER, R.; KOST, D.; GUO, X.; BIGHAM, J.M.; BEEGHLY, J.; DICK, W.A. **Surface coal mine land reclamation using a dry flue gas desulfurization product: Long-term biological response**. Fuel, v.105, p.258-265, 2013.

CHEN, L., DICK, W. A. **Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines**. Ohio State University Extension, 2011.

CHEN, L.; DICK, W. A.; NELSON, S. **Flue gas desulfurization by-products additions to acid soil: alfalfa productivity and environmental quality.** *Environmental Pollution*, 2001. v. 114, n. 2, p. 161-168.

CHEN, Q., WANG, S., LI, Y., ZHANG, N., ZHAO, B., ZHUO, Y., & CHEN, C. Influence of flue gas desulfurization gypsum amendments on heavy metal distribution in reclaimed sodic soils. **Environmental engineering science**, v. 32, n. 6, p. 470-478, 2015.

CHIBBER, N. **Sulfur deficiency in Madhya Pradesh soil leads to poor harvest. Down to Earth** (15 Aug. 2007). Disponível em: <http://www.downtoearth.org.in/news/sulfur-deficiency-in-madhya-pradesh-soil-leads-to-poor-harvest-6346>. Acesso em 06 fev 2020.

CLARK, R. B.; RITCHEY, K. D.; BALIGAR, V. C. **Benefits and constraints for use of FGD products on agricultural land.** *Fuel*, v. 80, n. 6, p. 821-828, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO - CETESB. **Ambiental. Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo.** São Paulo, CETESB, 2001. 73p. (Série Relatórios Ambientais).

Companhia Nacional de Abastecimento. **Compêndio de Estudos Conab / Companhia Nacional de Abastecimento.** – v. 1 (2016-). - Brasília: Conab, 2016.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira – grãos.** V.6. SAFRA 18/19 – N. 12 – Décimo segundo levantamento, Setembro 2019. Acesso em: 11 de setembro de 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em 16 fev 2020.

CÓRDOBA, P. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs. **Fuel**, v. 144, p. 274–286, 2015.

COSTA, C. H. M. **Efeito residual da aplicação superficial de calcário e gesso nas culturas de soja, aveia-preta e sorgo granífero.** 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

COSTA, C.H.M., CRUSCIOL, C.A.C., 2016. **Long-term effects of lime and phospho gypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties.** *Eur. J. Agron.* 74, 119–132.

COSTA, Claudia das Neves. Bio disponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul: 2005. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.5, p. 1323-1328, set-out, 2007.

COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M.; DECARLI, L. D.; PELÁ, A.; SILVA, C. J.; MATTER, U. F.; OLIBONE, D. Compostagem de resíduos sólidos de frigorífico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 100-107, 2009.

CQFS – RS/SC, 2016 – Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina / Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul. 376 p. 2016.

CRM - Companhia Rio Grandense de Mineração, 2018. Disponível em: <[http://www2.crm.rs.gov.br/hypervisual/carvao/carvao_candiota.php?secao=c arvao](http://www2.crm.rs.gov.br/hypervisual/carvao/carvao_candiota.php?secao=c%20arvao)>

CRM-AGRO MATERIAIS DE REFERÊNCIA PARA AGRICULTURA, PECUÁRIA E TOXICOLOGIA. Exercício Colaborativo CRM-Agro FT_012016. Universidade de São Paulo – **Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Laboratório de Radioisótopos**, Piracicaba: SP. 2016.

CROCKER, William. History of the use of agricultural gypsum. **Gypsum Industries Association, Chicago, IL**, 1922.

DA ROCHA, I. T. M., DA SILVA, A. V., DE SOUZA, R. F., & FERREIRA, J. T. P. Uso de resíduos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista Verde** (Mossoró – RN - BRASIL), v. 8, n. 5, p. 47 - 52, (Edição Especial) dezembro, 2013.

DALLA NORA, D. D.; AMADO, T. J. C. **Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yield under no-till**. *Agronomy Journal*, v.105, p.1393-1403, 2013.

DALLA NORA, D., AMADO, T.J.C., NICOLOSO, R.S., MAZUCO, A.C.B., PICCIN, M., 2017. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Rev. Bras. Cienc. Solo** 41, 1–22.

DANIELS, W.L.; ZIPPER, C.E. **Creation and Management of Productive Mine Soils: Powell River Project**. Virginia: Virginia State University, 13 p. 2010.

DESUTTER, T. M.; CIHACEK, L. J.; RAHMAN, S. **Application of flue gas desulfurization gypsum and its impact on wheat grain and soil chemistry**. *Journal of environmental quality*, v. 43, n. 1, p. 303-311, 2014.

DIAS, L.E. Uso de gesso como insumo agrícola. Comunicado técnico, ISSN 0103-9407, N°7, p. 1-6, maio, 1992.

DNPM - ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO. V.35. 1. ECONOMIA MINERAL – ESTATÍSTICA – BRASIL. 2. MINERAÇÃO – ESTATÍSTICA – BRASIL. 1. BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. 2010.

CARMO, D. L., SILVA, C. A. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 10, p. 1762-1772, 2016.

DUARTE, S. N.; SILVA Ê. F. DE F. E; MIRANDA J. H. DE; MEDEIROS J. F. DE; COSTA R. N. T.; GHEYI H. R. **Fundamentos de drenagem agrícola**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2015. 356 p.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Composition and leaching of FGD gypsum and mined gypsum**. EPRI Technical Rep. 1022146. EPRI, Palo Alto: CA. 2011.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **A review of agricultural and other land application uses of flue gas desulfurization products**. EPRI Technical Update Rep. 101385. EPRI, Palo Alto: CA. 2006.

EMATER/RS – Safra de verão 2018-2019: Estimativa de área de plantio, produção e produtividade. Gerência de Planejamento; Núcleo de Informações e Análises. Porto Alegre, 26 de abril de 2019.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

EMBRAPA 2017 - Balbinot Junior, A. A., Hirakuri, M. H., Franchini, J. C., Debiasi, H., & Ribeiro, R. H. Análise da área, produção e produtividade da soja no Brasil em duas décadas (1997-2016). **Embrapa Soja-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2017

ENDALE, D. M., SCHOMBERG, H. H., FISHER, D. S., FRANKLIN, D. H., & JENKINS, M. B. **Flue gas desulfurization gypsum: Implication for runoff and nutrient losses associated with broiler litter use on pastures on Ultisols**. Journal of environmental quality, v. 43, n. 1, p. 281-289, 2014.

EPE [EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA]. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2015.

ERNANI, P.R., D.J. MIQUELLUTI, S.M.V. FONTOURA, J. Kaminski, and ALMEIDA, J A. Down ward movement of soil cations in: **highly weathered soils caused by addition of gypsum**. Commun. SoilSci. Plant Anal. 2006.

FANNING, D.S; FANNING, M.C.B. **Soil: morphology, genesis and classification**. New York, 1989; J. Wiley. 395p.

FERREIRA, J. T. P. **Caracterização de Planossolos desenvolvidos em diferentes condições geo ambientais do Estado de Pernambuco**. 2011. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco UFRPE, Recife, 2011.

FINKELMAN, R.B.; GROSS, P.M.K. **The types of data needed for assessing the environmental and human health impacts of coal**. International Journal of Coal Geology, v.40, n.1-2, p.91-101, 1999.

FISCHER, A.; FISCHER, H. Restoration of forests. In: VAN ANDEL, J., ARONSON, J. **Restoration Ecology**. Malden, MA: Blackwell, 2006. p. 340.

FONTOURA, S. M. V., DE CASTRO PIAS, O. H., TIECHER, T., CHERUBIN, M. R., DE MORAES, R. P., & BAYER, C. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27-41, 2019.

FRANCHINI, J.C.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, A. **Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol**. *Comm. SoilSci. Plant Anal.*, 34:2045-2058, 2003.

GANJEGUNTE, G.K.; WICK, A.F.; STAHL, P.D.; VANCE, G.F. **Accumulation and composition of total organic carbon in reclaimed coal mine lands**. *Land Degradation & Development*, v. 20, p. 156–175, 2009.

GASCHO, G.J.; PARKER, M.B. Long-term liming effects on coastal plain soils and crops. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 1305-1315, 2001.

GOMES, S. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 459-465, 2007.

GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI M. A. P.; ZULIANI, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. **Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos**. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. 4, p. 345-390, 2005.

HAMRIC, R. **Utilization of CFB ash in reclamation to prevent post-mining AMD**. 14th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, West Virginia University, Morgantown, WV, 1993. 27–28 April. Retrieved from <http://wvmdtaskforce.com/proceedings/93/94HAM/94HAM.HTM>.

HEIDRICH, C., FEUERBORN, H. J., & WEIR, A. Coal combustion products: a global perspective. In: **World of coal ash conference**. 2013. p. 22-25. Disponível em: <https://www.gypsum.org/wp-content/uploads/2014/06/VGBPowerTech2013-12pp46-52HEIDRICHAutorenexemplar.pdf>. Acesso em 26 mar 2020.

HEINIGER, R.W.; MCBRIDE, R.G.; CLAY, D.E. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. **Agronomy Journal**, v.95, p.508-519, 2003.

HOLANDA NETO, MANOEL RIBEIRO. **Atributos microbiológicos de um solo construído vegetado com gramíneas após mineração de carvão em Candiota/RS / Pelotas**. 2011.- 95f.: Il. - Dissertação (Mestrado em solos) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2011.

HOLLAND, J.E., BENNETT, A.E., NEWTON, A.C., WHITE, P.J., MCKENZIE, B.M., GEORGE, T.S., PAKEMAN, R.J., BAILEY, J.S., FORNARA, D.A., HAYES, R.C., 2018. **Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: a review**. *Sci.*

Total Environ. 610–11, 316–332. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020>. Acesso em: 15 fev 2020.

IRGA – BOLETIM DE RESULTADOS DA LAVOURA – Safra 18/19 – **Arroz irrigado e soja em rotação**. 2019. Disponível em : <https://irga.rs.gov.br/irga-divulga-boletim-de-resultados-da-safra-2018-2019>. Acesso em: 12 de setembro de 2019.

JALALI, M., ROWELL. D.L. **Potassium leaching in undisturbed soil cores following surface applications of gypsum**. Environ. Geol. 2008. 57:41–48. doi:10.1007/s00254-008-1280-6.

JOHNSON, D. B.; HALLBERG, K. B. **Acid mine drainage remediation options: a review**. Science of the total environment, v. 338, n. 1-2, p. 3-14, 2005.

JUNIOR, A. R., URIBE-OPAZO, M. A., DE SOUZA, E. G., & JOHANN, J. A. **Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo e da produtividade da soja num sistema de agricultura de precisão**. Engenharia na Agricultura: Viçosa, v. 14, n. 3, p. 156-169, 2006.

KABATA-PENDIAS A, ADRIANO DC. In: Rechcigl JE, editor. **Soil amendments and environmental quality**. Boca Raton, FL: Lewis, 1995.

KALYONCU, R. S.; OLSON, D. W.; **Coal combustion products**. 2001. Disponível em: < <https://pubs.usgs.gov/fs/fs076-01> 2001). Acesso em: 15 fev 2020.

KÄMPF, N. et al. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, 1997. v.21, p.79-88.

KASHEM, M. A. SINGH, B. R. **The effect of fertilizer additions on the solubility and plant-availability of Cd, Ni and Zn in soil**. NutrCycl Agroecosyst. 2002. v.62, p.287-296.

KITAMURA, A. E.; ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; GONZALEZ, A. P. **Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto**. R. Bras. Ci. Solo, v.32, p.405-416, 2008.

KNOX, A. S., KNOX, J. D., ADRIANO, D. C., & SAJWAN, K. S. (2006). Influence of coal combustion fluegas desulfurization waste on element uptake by maize (Zeamays L.). In: **Coal combustion by products and Environmental Issues**. Springer, New York, NY, 2006. p. 184-189.

KOCHIAN, L. V.; JONES, D. L. Aluminum toxicity and resistance in plants. In: YOKEL, R.; GOLUB, M. S. **Research Issues in Aluminum Toxicity**. Bristol: Taylor and Francis Publishers, 1997. p.69-90.

KOPPE, J.C. & COSTA, J.F.C.L. Mineração. In: TEIXEIRA, E. C. **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. cap. 1, p. 15-28.

KOPPE, Jair Carlos. **CAPÍTULO 1. A lavra e a indústria mineral no Brasil—estado da arte e tendências tecnológicas.** Geociências e Tecnologia Mineral. 2007. p. 81.

KORCAK RF. IN: KARLEN DL, WRIGHT RJ, KEMPER WD, editors. **Agricultural utilization of urban and industrial by-products**, Special publication no. 58. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1995.

KOSTA, D. A., BINGHAM, J. M., STEHOUWER, R. C., BEEGHLY, J. H., FOWLER, R., TRAINA, S. J., WOLFE, W. E., and DICK, W. A. **Chemical and physical properties of dry fluegas desulfurization products.** J. Environ. Qual. 2005.34, 676–686.

LAMBERT, R., GRANT, C. SAUVÉ, S. **Cadmium and zinc in soil solution extracts following the application of phosphate fertilizers.** Science of The Total Environment, 2007. v.378, n.3, p.293-305.

LEE, Y. B., BIGHAM, J. M., & KIM, P. J. Evaluate changes in soil chemical properties following FGD-gypsum application. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 26, n. 4, p. 294-299, 2007.

LI, M. S. **Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice.** Science of the Total Environment, v. 357, p. 38– 53, 2006.

LIMA, E.; VITTI, G. C.; SANTOS, L. A.; CICARONE, F. Capítulo XIII – **Cálcio e Magnésio.** In: **Nutrição mineral de plantas.** Editores Manlio Silvestre Fernandes, Sonia Regina de Souza e Leandro Azevedo Santos. – 2. Ed. – Viçosa, MG: SBCS, 2018. 670 p.

LIU, R., AND LAL, R. (2013). **A laboratory study on amending mine soil quality: water air soil pollut.** 2013. 224, 1679.

LOPES, C. M. **Adsorção individual e competitiva de Cd, Cu, Ni e Zn em solos em função da variação de pH.** 2009, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LUNARDI NETO, A., ALBUQUERQUE, J. A., ALMEIDA, J. A. D., MAFRA, Á. L., MEDEIROS, J. C., & ALBERTON, A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1379-1388, 2008.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação.** 4. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 256p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. AI. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** 1997.

MAO, Y., LI, X., DICK, W. A., & CHEN, L. Remediation of saline–sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China. **Journal of environmental sciences**, v. 45, p. 224-232, 2016.

MARCHESAN, E.; TONETTO, F.; TELÓ, G. M.; COELHO, L. L.; ARAMBURU, B. B.; TRIVISOL, V. S. **Soil management and application of agricultural gypsum in a Planosol for soybean cultivation**. *Ciência Rural*. 47(11). 2017.

MARSOLA, T; MIYAZAWA, M; PAVAN, M. A. Acumulação de cobre e zinco em tecidos do feijoeiro em relação com o extraído do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 92-98, 2005.

MAUAD, M., SILVA, T. L. B., NETO, A. I. A., & ABREU, V. G. **Influência da densidade de semeadura sobre características agronômicas na cultura da soja**. *Agrarian*, v. 3, n. 9, p. 175-181, 2010.

McCray, J.M., and M. E. Sumner. **Assessing and modifying Ca and Al levels in acid subsoils**. *Advances in SoilSci*. Springer New York: 1990. P. 45-75.

MEURER, E.J. **Fundamentos de Química do Solo**. 6ª Ed./ Egon José Meurer, Editor. Porto Alegre, 2017. 280p.: il.

MICHALOVICZ, L.; MULLER, M.M.L.; FOLONI, J.S.S.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R.; KRAMER, L.F.M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:1496-1505, 2014.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2ª ed. 2001. 626p.

MOREIRA, S. G.; KIEHL, J. C.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 25, núm. 1, 2001, pp. 71-81 Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Viçosa, Brasil.

MUKHOPADHYAY S, MAITI S. K., MASTO R. E. **Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study**. *Ecol. Eng.* 71: 10-20. 2014.

MURARKA, I. P., MATTIGOD, S. V., AND KEEFER, R. F., Research Related to Effective Management of Coal Combustion Residues, In: **Trace Elements in Coal and Coal Combustion Residues**, 1993.

NASCIMENTO, F.M.F.; MENDONÇA, R.M.G.; MACEDO, M.I.F.; SOARES, P.S.M. **Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina**. Contribuição Técnica elaborada para II Congresso Brasileiro de Minas Aberto e II Congresso Brasileiro de Minas Subterrâneas. Belo Horizonte. IBRAM. 2002.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 409-416, 2010.

NORTON, L.D. **Gypsum soil amendment as a management practice in conservation tillage to improve water quality**. J. Soil Water Conserv. 63:46A–48^a. 2008.

NUNES, M. C. D. **Condições físicas de solos construídos na área de mineração de carvão de Candiota-RS**. Pelotas-RS, 2002. 130f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas, 2002.

O'SHAY, T.; HOSSNER, L.R.; DIXON, J.B. **A modified hydrogen peroxide oxidation method for determination of potential acidity in pyritic overburden**. J. Environ. Qual. Madison. 1990. v. 19, p.778-782.

OLIVEIRA, S.A.; CAVARIANI, C.; SILVA, E.C.; SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C. **Efeito da calagem e gessagem superficiais na produção e qualidade de sementes de arroz em sistema de plantio direto**. **Cultura Agrônômica**, v.18, nov., 2009.

OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CRUZ, C. D. Importância relativa dos metais pesados do solo na identificação e separação de materiais de origem. **Revista Ceres**, v. 45, p. 359- 371, 1998.

PAULETTI, V.; PIERRI, L.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495–505, 2014.

PAULETTO, E.A.; STUMPF, L.; PINTO, L.F.S.; SILVA, T.S.; AMBUS, J.V.; GARCIA, G.F.; DUTRA JUNIOR, L.A.; SCHEUNEMANN, T.; ALBERT, R.P. Reclamation of a degraded coal-mining area with perennial cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, n.1, p.1- 13. 2016.

PELOZATO, M. **Valores de referência de cádmio, cobre, manganês e zinco para os solos de Santa Catarina**. 2008. 64p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

PERALTA, N.R.; COSTA, J.L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.99, p.218-226, 2013.

PETRERE, C., ANGHINONI, I. **Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo**. R. Bras. Ci. Solo, 25:885-895, 2001.

PINTO, L. F. S.; KÄMPF, N. Contaminação dos solos construídos. In: PINTO, L. F. S.; KÄMPF, N. **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/FEPAM, 2002, p.69-92.

PINTO, Luiz Fernando Spinelli. **Potencial de acidificação e de neutralização dos materiais geológicos para a composição de solo construído em área de mineração de carvão**. 186f. Tese (doutorado em ciência do solo) Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre-RS. 1997.

PONNAMPERUMA, Felix Nelson. The chemistry of submerged soils. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 1972. p. 29-96.

PULZ, A. L., CRUSCIOL, C. A. C., LEMOS, L. B., & SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1651-1659, 2008.

PUNSHON, T., KNOX, A. S., ADRIANO, D. C., SEAMAN, J. C., & WEBER, J. T. Flue Gas Desulfurization (FGD) Residue. In: **Biogeochemistry of trace elements in coal and coal combustion byproducts**. Springer, Boston, MA, 1999. p. 7-28.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAIJ, B. van; SILVA, N.M. da; BATAGLIA, O.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100 - 2ª edição).

RAIJ, B. Van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no solo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1988, 111p.

RAMPIM, L.; LANA, M.C.; FRANDOLOSO, J.F. & FONTANIVA, S. **Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta**. R. Bras. Ci. Solo, 35:1687-1698, 2011.

RAMPIM, Leandro; DO CARMO LANA, Maria; FRANDOLOSO, Jucenei Fernando. Fósforo e enxofre disponível, alumínio trocável e fósforo remanescente em latossolo vermelho submetido ao gesso cultivado com trigo e soja Semina. **Ciências Agrárias**, vol. 34, núm. 4, julho-agosto, 2013, pp. 1623-1638. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, Brasil.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. **Amelioration of sub soil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments**. Agrochemophysica, Pretoria, v. 4, p. 1-6, 1972.

RHOTON, F.E. & MCCHESENEY, D. S. **Influence of fgd gypsum on the properties of a highly erodible soil under conservation tillage, communications in soil science and plant analysis**, 42:16, 2012-2023. 2011.

RIBEIRO, E. S.; PEREIRA, M. P.; CASTRO, E. M.; BARONI, G. R.; CORRÊA, F. F.; PEREIRA, F. J. Relação de anatomia radicular na absorção, no acúmulo e na tolerância ao chumbo em *Echinodorus grandiflorus*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 605-612, 2015.

RITCHEY, K. D., CLARK, R. B., ELRASHIDI, M. A., AND BALIGAR, V. C. **Properties and examples of beneficial use of gypsumlike by-products.** In **“Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products”** (J. F. Power and W. A. Dick, Eds.), pp. 537–565. Soil Science Society of America, Madison, WI, Book Series No. 6. 2000.

ROCHA, I. T. M., DA SILVA, A. V., DE SOUZA, R. F., & Ferreira, J. T. P. Uso de resíduos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista Verde (Mossoró – RN - BRASIL)**, v. 8, n. 5, p. 47 - 52, (Edição Especial) dezembro, 2013.

ROSSO, R. B., PEITER, M. X., ROBAINA, A. D., Torres, R. R., & KIRCHNER, J. H. **Uso de camalhões de base larga para a viabilização do cultivo de soja em terras baixas.** IRRIGA, v. 23, n. 4, p. 679-696, 2018.

SABEDOT, S. et al. Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas. **Anais do III Congresso de Carvão Mineral.** 2011. Disponível em: < http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B4_B5_B6/B6_ARTIGO_01.pdf >. Acesso em 15 fev 2020.

SAKAI, Y., MATSUMOTO, S., AND SADAKATA, M. (2004). **Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of metal content in corn grains.** Soil Sediment. Contam. 13, 65. 2004.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; DELLA FLORA, L. P.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTOS, D. C. **Alterações químicas e biológicas em solo de área de mineração de carvão submetido a diferentes cultivos.** 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

SARTORI, G. M. S.; MARCHESAN, E.; DE DAVID, R.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DONATO, G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; SILVA M. F. Rendimento de grãos de soja em função de sistemas de plantio e irrigação por superfície em Planossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 12, p. 1139-1149, 2015.

SCHAFER, W.M.; NIELSEN, G.A. & NETTLETON, W.D. **Minesoil genesis and morphology in a spoil chrono sequence in Montana.** Soil Sci. Soc. Am. J., 44:802-807, 1980. Disponível em: < <https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/44/4/SS0440040802?access=0&view=pdf> >. Acesso em 05 fev 2020.

SCHUECK, J., DIMATTEO, M., SHEETZ, B., & SILSBEE, M. **Water quality improvements resulting from FBC ash grouting of buried piles of pyritic materials on a surface coal mine.** Seventeenth Annual West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium, Morgantown, 1996. WV, 2–3 April.

SCHERER, H. W. **Sulphur in crop production** — invited paper. *European Journal of Agronomy*. 2001.

SCHULTZE, J. P. S. **Recuperação de áreas mineradas. Estudo da mina de carvão de Candiota-RS**. Seminário do Curso de Mestrado em Geologia, UNISINOS, São Leopoldo RS, 23p. 1998.

SEYBOLD, Cathy A.; GROSSMAN, Robert B.; SINCLAIR, H. Raymond; MCWILLIAMS, Kendall M.; STRUBEN, Gary R.; WADE, Steve L. Evaluating soil quality on reclaimed coal mine soils in Indiana. In: **Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force**, 2004, Lexington, KY. American Society of Mining and Reclamation, 2004. p. 1644–1663.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M.E.; MILLER, W.P.; FARINA, M.P.W.; PAVAN, M.A. & FEY, M.V. **Use of gypsum on soils**: A review. *Adv. Soil Sci.*, 9:1-111, 1989.

SHRESTHA, R.K.; LAL, R. **Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil**. *Environment International*, v. 32, p. 781–796, 2006.

SILVA, J. J. C. da; RAUPP, A. A. A.; SOUZA, R. M. de; COELHO, R. W.; RODRIGUES, R. C.; BEVILAQUA, G. A. P.; SILVA, A. C. da. **Culturas alternativas em sistema de camalhão de base larga na região costeira do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. Comunicado Técnico.

SILVA, Mariana Tavares. **Potencial de acidificação e contaminação por metais em solos construídos na área de mineração de carvão em Candiota-RS**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas: 2012. 58p. Dissertação de Mestrado.

SIQUEIRA, J.O.; SOARES, C.R.F.S.; SILVA, C.A. Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O. (Eds) **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ª Ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p.498-525.

SKOUSEN, Jeffrey; ZIEMKIEWICZ, Paul; YANG, Jae Eui. **Use of coal combustion by-products in mine reclamation**: review of case studies in the USA. *Geosystem Engineering*, v. 15, n. 1, p. 71-83, 2012.

SLOAN, J. J., DOWDY, R. H., DOLAN, M. S., & REHM, G. W. **Plant and soil responses to field-applied fluegas desulfurization residue**. *Fuel*, v. 78, n. 2, p. 169-174, 1999.

SMITH, D.B., W.F. CANNON, L.G. WOODRUFF, F. SOLANO, J.E. KILBURN, FEY, D.L. **Geochemical and mineralogical data for soils of the conterminous. United States**. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey: Data Series 801. USGS, Reston, VA.2013.

SOARES, L. H., FAGAN, E. B., CASAROLI, D., ANDRADE, D. M. D., SOARES, A. L., MARTINS, K. V., & ROCHA, F. J. D. Aplicação de diferentes estrobilurinas na cultura da soja. **Revista da FZVA**. Uruguaiana, v.18, n. 1, p. 78-97. 2011.

SOBRAL, M. F.; NASCIMENTO, C. W. A. D.; CUNHA, K. P. V. D.; FERREIRA, H. A.; SILVA, A. J.; SILVA, F. B. V. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [S.l.], 2011. v. 15, p. 867-872.

SOMAVILLA, L.; PINTO, M.A.B.; BASSO, C.J.; DA ROS, C.O.; SILVA, V.R.; BRUN, T.; SANTI, A.L. Response of soy bean and corn to soil mechanical intervention and agricultural gypsum application to the soil surface. **Seminário Ciências Agrárias**. v. 37, p. 95-102, 2016.

SORATTO, R.P. CRUSCIOL, C.A.C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Ciência Rural**. 2008. vol. 38, n. 4, p. 928-935.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; MELLO, F.F.C. **Componentes da produção e produtividade de cultivares de arroz e feijão em função de calcário e gesso aplicados na superfície do solo**. Bragantia, Campinas, v. 69, n. 4, p965-974, 2010.

STOKES, J.D.; PATON, G.I.; SEMPLE, K.T. **Behaviour and assessment of bioavailability of organic contaminants in soil**: relevance for risk assessment and remediation. *Soil Use and Management*, v. 21, p. 475-486, 2006.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed.rev.ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; DE CASTRO, R. C.; PINTO, L. F. S.; F., F. F.; DA SILVA, T. S.; A, J. V.; GARCIA, G. F.; LIMA, C. L. R.; NUNES, M. R. **Capability of grass in recovery of a degraded area after coal mining**. *Agrociencia*, v. 48, n. 5, pg. 477-487. 2014.

STUMPF L, PAULETTO E. A., FERNANDES F. F., SUZUKI L. E. A. S, SILVA T. S., PINTO L. F. S., LIMA C. L. R. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil in a coal mining area in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 38: 327-35. 2014a.

STUMPF, L., PAULETTO, E. A., PINTO, L. F. S., AMBUS, J. V., GARCIA, G. F., DA SILVA, T. S. Características químicas de um solo construído e seus efeitos no desenvolvimento radicular de gramíneas perenes. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 4, p. 343-349, 2016.

STUMPF, L., PAULETTO, E. A., PINTO, L. F. S., GEISSLER, L. O., CASTILHOS, D. D., DE SOUZA, D. L., PIMENTEL, J. P., ALDRIGUI, L. Biological and physical quality

of a mined soil under revegetation with perennial grasses. **Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, 2018.

TAIZ, L. et al (Ed.). **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEDESCO, M. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

TEIXEIRA, J. D. C., VIEIRA, D. F., SILVA, S. A., FILHO, P. S. L. D. C., FILHO, J. W. M. F. Estudo dos produtos da combustão do carvão mineral visando seu aproveitamento como material cerâmico. In: **Congresso técnico científico da engenharia e da agronomia, Fortaleza**. 2015.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. **Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos**. Soja: manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2010.

TIWARY, R. K.; DHAR, B. B., JAMAL, A. **Acid Mine Drainage Occurrences and Its Control in Indian Coal Mines**. In: PROCEEDINGS OF THE 27TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF SAFETY IN MINES RESEARCH INSTITUTE, 1997, New Delhi, India, February, p. 1253–1259. 1997.

USEPA. **Agricultural uses for flue gas desulfurization (FGD) gypsum**. <http://www.epa.gov/osw>, U.S. Environmental Protection Agency. EPA530-F08-009 (March 2008).

VERNETTI, F.J.; VERNETTI JUNIOR, F.J. **Genética da soja**: caracteres qualitativos e diversidade genética. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 221p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 743-755, jul./ago. 2009.

VITTI, G.C.; OTTO, R.; SAVIETO, J.; LIMA, E.; SANTOS, L. A. Capítulo X – Enxofre. In: **Nutrição mineral de plantas** Editores Manlio Silvestre Fernandes, Sonia Regina de Souza e Leandro Azevedo Santos. – 2. Ed. – Viçosa, MG: SBCS, 2018. 670 p.

WATTS, D. B., & DICK, W. A. Sustainable uses of FGD gypsum in agricultural systems: Introduction. **Journal of environmental quality**, v. 43, n. 1, p. 246-252, 2014.

WANG, S. J., CHEN, C. H., XU, X. C., LI, Y. J. **Amelioration of alkali soil using fluegas desulfurization by products**: productivity and environmental quality. *Environmental Pollution*. 2008, v. 151, n. 1, p. 200-204.

WANG, S. J. et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 121, p. 82-92, 2017.

WENDELL, R.R. AND K.D. RITCHEY. **High-calcium flue gas desulfurization products reduce aluminum toxicity in an Appalachian Soil.** J. Environ. Qual. 1996.25:1401-1410.

WCA – World Coal Association, 2018. Disponível em: <https://www.worldcoal.org/coal/uses-coal/coal-electricity>. Acesso em 03 fev 2020.
WENDELL, R.R. and K.D. RITCHEY. High. Calcium flue gas desulfurization products reduce aluminum toxicity. In: **An Appalachian Soil.** J. Environ. Qual. 25:1401-1410. 1996.

WU, M. C. M. et al. **Dry FGD by-product characteristic and utilization – international perspective,** 2011. Disponível em: < <http://www.flyash.info/2011/189-Wu-2011.pdf> >. Acesso em 05 fev 2020.

XU, S., LAN, P., LIAO, X., CHEN, C., XU, X., AND LI, S. Study on the environmental behaviors of heavy metals in desulphurization byproduct. **Ecol. Environ.** 14, 38. 2005.

YANG, Z.; WANG, B. Progress in techniques of improvement and utilization of saline-alkali land in China and its future trend. **J. Soil Water Conserv**, v. 2, p. 1-11, 2014.

ZAMBROSI, F.C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Aplicação de gesso agrícola e especiação iônica da solução de um Latossolo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 110-117, 2007.

ZAMBROSI, F.C.B.; ALLEONI, L.R.F. & CAIRES, E.F. **Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system.** Sci. Agric., 65:190-203, 2008.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 45(2), 128-137. 2015.

ZHANG L., JINMANWANG W., BAI Z., CHUNJUAN L.V. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. **Catena.** 2015.

ZOCCA, S.M., PENN, C. **An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture.** Adv. Agron. 144, 1–44. 2017.